

Universidade Federal do Espírito Santo
Centro Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Thais Pedruzzi do Nascimento

O Uso do SSIM Como Critério de Convergência em
Abordagens Bayesianas Variacionais de Superresolução
Multiframe

Vitória

2015

Thais Pedruzzi do Nascimento

O Uso do SSIM Como Critério de Convergência em Abordagens Bayesianas Variacionais de Superresolução Multiframe

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal do Espírito Santo

Centro Tecnológico

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Evandro Ottoni Teatini Salles

Vitória

2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

N244u Nascimento, Thais Pedruzzi do, 1989-
O uso do SSIM como critério de convergência em
abordagens Bayesianas variacionais de superresolução
multiframe / Thais Pedruzzi do Nascimento. – 2015.
129 f. : il.

Orientador: Evandro Ottoni Teatini Salles.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Processamento de imagens. 2. Métodos iterativos
(Matemática). 3. Super-resolução. 4. Índice de similaridade
estrutural (SSIM). 5. Variação total (Matemática). 6. Critério de
Convergência. I. Teatini, Evandro Ottoni Salles. II. Universidade
Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 621.3

Thais Pedruzzi do Nascimento

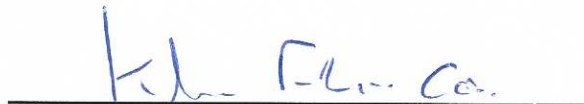


O Uso do SSIM Como Critério de Convergência em Abordagens Bayesianas Variacionais de Superresolução Multiframe

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. Vitória, 9 de outubro de 2015:



Prof. Dr. Evandro Ottoni Teatini
Salles - UFES
Orientador


Prof. Dr. Klaus Fabian Côco - UFES
Membro Interno
Prof. Dr. Marcelo Oliveira Camponez
- UVV
Membro Externo
Prof. Dr. Nelson Delfino d'Ávila
Mascarenhas - FACCAMP
Membro Externo

Vitória
2015

Agradecimentos

Aos meus pais, Wagner e Glória, que me apoiam em qualquer decisão que eu tomo, mesmo que isso signifique me bancar por mais seis (agora 4!) anos. À Júlia, por ser companheira de trânsito, de italiano e de vida diária. E aos três, por todas as conversas no sofá, no carro, na mesa do café, do almoço ou do jantar. Por me lembrarem que a felicidade nem sempre está na obriedade do dinheiro e por serem meu porto seguro.

Aos meus tios, tias, avós e primos por fazerem força pra entender o que eu faço da minha vida. Pela torcida e apoio incondicionais, pelas orações, por se mostrarem orgulhosos de toda e qualquer vitória. Por todos os almoços e churrascos barulhentos, cheios de amor e carinho!

Ao Ewerton, meu companheiro, pelo apoio eterno, por me lembrar o motivo de ter escolhido a carreira acadêmica quando eu esqueço dele e penso em desistir. Por torcer pelo meu crescimento profissional e acreditar no meu sucesso. Obrigada por esses 7 anos de caminhada. À família Costa, que me acolheu como neta/sobrinha/nora, por todas as orações e por torcer pelas vitórias de nós dois.

À Nathalia, por deixar que eu fale sobre superresolução em todas as conversas e por revisar meus textos. Por ouvir todos os meus lamentos em tempo real, opinar e me dar sensatez nos momentos de ansiedade. Ao Davi, por acompanhar a contagem regressiva das seções deste trabalho e por entender que eu “pego várias imagens pequenas e transformo numa imagem maior”. E aos dois, por estarem presentes, ainda que fisicamente distantes.

À Nanda e à Larissa, por estarem comigo desde antes de aprendermos a somar. À Marcela, pelas longas conversas e por todos os momentos de amizade. À Luisa e à Érica por se fazerem presentes virtualmente e por me ajudarem a enxergar a vida de uma perspectiva menos engenheira. A todas as amigas e amigos - cujos nomes não caberiam aqui - pelas conversas, cervejas, encontros e apoio. Por torcerem por mim - de longe e de perto - e não perguntarem quando eu vou começar a trabalhar de verdade.

Ao Prof. Evandro, por me orientar há 4 anos e não se cansar dos meus surtos emocionais, por ser mentor e quase psicólogo. Por não parecer impaciente após ouvir, repetidamente, a frase “não entendi!”. Por me ensinar que “o aprendizado é um processo gradativo”, por acreditar no meu trabalho, e por todas as orientações e disponibilidade que possibilitaram a conclusão deste mestrado.

À Prof^a. Raquel, pela amizade, acolhimento e solidariedade em momentos de nervosismo.

À minha psicóloga, Juliana, por me ajudar a entender minhas ansiedades, a planejar

e organizar os meus dias, tornando-os mais produtivos.

Aos meus colegas de laboratório, pelas informações, risadas, cafés e lanches compartilhados (ainda que algumas risadas sejam em detrimento da minha credibilidade). Ao Victor, especificamente, que me mostrou o trabalho que acabou se tornando uma das minhas principais referências. Aos outros colegas de pós-graduação que também cruzaram o meu caminho pelo mestrado. À CAPES pela bolsa concedida e ao PPGEE, pelo mestrado oferecido. Aos professores, pelas disciplinas ofertadas.

Resumo

Superresolução multiframe (SR multiframe) é uma técnica que gera uma imagem de alta resolução a partir de várias imagens de baixa resolução. Diferentes métodos foram desenvolvidos com o objetivo de implementar tal técnica com sucesso. Alguns desses utilizam abordagens bayesianas e podem ser baseados em norma- ℓ_1 ou norma- ℓ_2 . A imagem de alta resolução a ser encontrada é, via de regra, obtida pela execução de um algoritmo iterativo que geralmente usa como critério de parada o erro médio quadrático (MSE ou *Mean Square Error*). Entretanto, o MSE não considera algumas características das imagens, que são percebidas pelo olho humano. Por outro lado, a métrica SSIM (*Structural Similarity Index Method*), usa características estruturais, de luminância e contraste para quantificar a diferença entre duas imagens que, no nosso caso, são a imagem estimada pelo algoritmo de superresolução e a original, de alta resolução. Assim sendo, nesse trabalho propõe-se o uso de SSIM como métrica de erro para conduzir o processo de ajuste iterativo na obtenção da imagem de alta resolução, de forma a explorar melhor os ganhos obtidos a partir de distribuições a priori que preservam bordas e outros detalhes estruturais. Para isso, comparou-se os resultados de diferentes métodos bayesianos variacionais de SR alterando-se o critério de convergência de MSE para SSIM. Uma bateria de testes foi proposta e os resultados mostraram que além da melhoria na avaliação final da imagem, houve uma melhoria no tempo de execução dos algoritmos.

Palavras-chave: Superresolução. SSIM. Similaridade Estrutural. Bayes Variacional. SAR. Norma ℓ_1 . Total Variation. Critério de Convergência

Abstract

Multiframe Superresolution is a technique that generates one high resolution image from several lower resolution images. Different SR methods attempt to implement superresolution successfully. Some of them use bayesian approaches and are based on ℓ_2 -norm or ℓ_1 -norm. The estimated high resolution image is obtained, in general, by running an iterative algorithm that usually uses MSE (Mean Squared Error) as its convergence criteria. However, MSE does not consider the image's structural characteristics that are perceived by the human eye. The structural similarity index method (SSIM), on the other hand, uses such characteristics, and luminance and contrast as well, to quantify the differences between the image estimated by superresolution and the original high resolution one. Therefore, in this work, we propose the use of SSIM as an error metrics to lead the iterative adjustment process to obtain the high resolution image, in order to explore in a better way, the gains obtained from a priori functions that preserve edges and structural details. In this regard, we have compared results from different variational Bayesian methods by changing the convergence criteria from MSE to SSIM. A set of experiments were proposed and the results showed that, in addition to the improvement of the quality image assessment, there was an improvement on the execution time of the algorithms.

Keywords: Superresolution. SSIM. Structural Similarity. Variational Bayes. SAR. ℓ_1 -norm. Total Variation. Convergence Criteria

Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação das matrizes bidimensionais de dois sensores de tamanhos diferentes, (a) 8×8 e (b) 16×16 . Representação das matrizes bidimensionais de dois sensores de dimensão 8×8 sobrepostos em deslocamento (c) de pixels e (d) de subpixels. (KATSAGGELOS; MOLINA; MATEOS, 2007).	28
Figura 2 – Representação gráfica do processo de aquisição das imagens LR, a partir das quais uma imagem HR é produzida, através da superresolução. (a) Aquisição utilizando câmeras fotográficas e (b) aquisição utilizando câmera de vídeo.(KATSAGGELOS; MOLINA; MATEOS, 2007)	29
Figura 3 – Representação gráfica do problema apresentado	30
Figura 4 – Diagrama do funcionamento da medição do SSIM (Adaptado de (WANG et al., 2004))	34
Figura 5 – Comparação ilustrativa entre o PSNR e o SSIM. Observe que todas as imagens na circunferência do círculo possuem a mesma PSNR em relação à original (Adaptado de (WANG; BOVIK, 2009)).	35
Figura 6 – Modelo de aquisição (Adaptada de (PARK; PARK; KANG, 2003))	38
Figura 7 – Detalhe do <i>grid</i> da imagem antes do deslocamento (em preto) e após o deslocamento (em vermelho) (Adaptado de (VILLENNA et al., 2013)).	39
Figura 8 – Exemplo de imagens LR e HR. (a) Imagem HR com dimensão 4×4 (b) Imagem LR, após processo de subamostragem, com dimensão 2×2	42
Figura 9 – Funcionamento básico de um algoritmo SR Bayesiano Variacional	51
Figura 10 – Conjunto de imagens HR originais utilizadas nos experimentos descritos no Capítulo 4, extensões dos arquivos dimensões respectivas. (a) <i>cartao</i> (png, 120×120), (b) <i>cr5210</i> (png, 128×128), (c) <i>cra5302</i> (png, 128×128), (d) <i>crahouse</i> (png, 128×128), (e) <i>EIAcen120</i> (png, 120×120), (f) <i>lena</i> (png, 128×128) and (g) <i>boats</i> (tif, 256×256).	58
Figura 11 – (a) Imagem Original <i>cartao</i> , (b) um das cinco imagens LR relacionadas, para $SNR = 44,07$ dB e resultados das simulações usando método SR ℓ_1 -SAR além de convergência e métrica de qualidade, respectivamente, (c) MSE e PSNR, (d) MSE e SSIM, (e) SSIM e PSNR, e (f) SSIM e SSIM. (g) Detalhes das Figuras 11c, (h) 11d, (i) 11e e (j) 11f	63
Figura 12 – (a) Imagem Original <i>EIAcen120</i> , (b) uma das cinco imagens LR relacionadas, para $SNR = 64,07$ dB e resultados das simulações usando método SR TV além de convergência e métrica de qualidade, respectivamente, (c) MSE e PSNR, (d) MSE e SSIM, (e) SSIM e PSNR, (f) SSIM e SSIM. (g) Detalhes das Figuras 12c, (h) 12d, (i) 12e e (j) 12f	65

Figura 13 – (a) Imagem Original <i>cartao</i> , (b) um das cinco imagens LR relacionadas, para $SNR = 49,07dB$ e resultados das simulações usando método SR SAR além de convergência e métrica de qualidade, respectivamente,(c) MSE e PSNR, (d) MSE e SSIM, (e) SSIM e PSNR, e (f) SSIM e SSIM.	66
Figura 14 – (a) Imagem Original <i>lena</i> , (b) um das cinco imagens LR relacionadas, para $SNR = 29,07dB$ e resultados das simulações usando método SR ℓ_1 -SAR além de convergência e métrica de qualidade, respectivamente,(c) MSE e PSNR, (d) MSE e SSIM, (e) SSIM e PSNR, e (f) SSIM e SSIM.(g) Detalhes das Figuras 14c, (h) 14d, (i) 14e e (j) 14f	67
Figura 15 – (a) Imagem Original <i>boats</i> , (b) um das cinco imagens LR relacionadas, para $SNR = 54,07dB$ e resultados das simulações usando método SR ℓ_1 além de convergência e métrica de qualidade, respectivamente,(c) MSE e PSNR, (d) MSE e SSIM, (e) SSIM e PSNR, e (f) SSIM e SSIM.(g) Detalhes das Figuras 15c, (h) 15d, (i) 15e e (j) 15f	68
Figura 16 – Gráfico dos tempos médios de processamento dos métodos de Superresolução, aplicados à imagem <i>cartao</i> . Em verde com marcador em círculo, os casos com convergência MSE e, em rosa com marcador em losango, os casos com convergência SSIM.	69
Figura 17 – Gráfico dos tempos médios de processamento dos métodos de Superresolução, aplicados à imagem <i>cr5210</i> . Em verde com marcador em círculo, os casos com convergência MSE e, em rosa com marcador em losango, os casos com convergência SSIM.	70
Figura 18 – Gráfico dos tempos médios de processamento dos métodos de Superresolução, aplicados à imagem <i>cra5302</i> . Em verde com marcador em círculo, os casos com convergência MSE e, em rosa com marcador em losango, os casos com convergência SSIM.	71
Figura 19 – Gráfico dos tempos médios de processamento dos métodos de Superresolução, aplicados à imagem <i>crahouse</i> . Em verde com marcador em círculo, os casos com convergência MSE e, em rosa com marcador em losango, os casos com convergência SSIM.	72
Figura 20 – Gráfico dos tempos médios de processamento dos métodos de Superresolução, aplicados à imagem <i>EIAcen120</i> . Em verde com marcador em círculo, os casos com convergência MSE e, em rosa com marcador em losango, os casos com convergência SSIM.	73
Figura 21 – Gráfico dos tempos médios de processamento dos métodos de Superresolução, aplicados à imagem <i>lena</i> . Em verde com marcador em círculo, os casos com convergência MSE e, em rosa com marcador em losango, os casos com convergência SSIM.	74

Figura 22 – Gráfico dos tempos médios de processamento dos métodos de Superresolução, aplicados à imagem *boats*. Em verde com marcador em círculo, os casos com convergência MSE e, em rosa com marcador em losango, os casos com convergência SSIM. 75

Lista de tabelas

Tabela 1	– Dimensão das matrizes e vetores presentes no modelo de aquisição . . .	37
Tabela 2	– Tempo médio de execução por simulação (em segundos) e diferença de tempos médios de execução (ΔT) por simulação, em segundos e porcentagem.	61
Tabela 3	– Porcentagem dos casos nos quais houve aprimoramento das métricas de qualidade (PSNR e SSIM) e no tempo de execução	62
Tabela 4	– Resultados referentes às Figura 11c a 11f, obtidas por um algoritmo SR ℓ_1 -SAR, aplicado a cinco imagens LR com SNR = 44,07 dB.	62
Tabela 5	– Resultados referentes às Figura 12c a 12f, obtidas por um algoritmo SR baseado TV, aplicado a cinco imagens LR com SNR = 64,07 dB. . . .	64
Tabela 6	– Resultados referentes às Figura 13c a 13f, obtidas por um algoritmo SR baseado em SAR, aplicado a cinco imagens LR com SNR = 49,07 dB. .	64
Tabela 7	– Resultados referentes às Figura 14c a 14f, obtidas por um algoritmo SR baseado em ℓ_1 -SAR, aplicado a cinco imagens LR com SNR = 29,07 dB. .	64
Tabela 8	– Resultados referentes às Figura 15c a 15f, obtidas por um algoritmo SR baseado em ℓ_1 , aplicado a cinco imagens LR com SNR = 54,07 dB. . .	65
Tabela A.1	– Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original <i>cartao</i>	84
Tabela A.2	– Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original <i>cartao</i>	85
Tabela A.3	– Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original <i>cartao</i>	86
Tabela A.4	– Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência MSE, a partir da imagem HR original <i>cartao</i>	86
Tabela A.5	– Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original <i>cartao</i>	87
Tabela A.6	– Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original <i>cartao</i>	88
Tabela A.7	– Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original <i>cartao</i>	89
Tabela A.8	– Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência SSIM, a partir da imagem HR original <i>cartao</i>	89

Tabela A.9–Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original <i>cr5210</i>	90
Tabela A.10–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original <i>cr5210</i>	91
Tabela A.11–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original <i>cr5210</i>	92
Tabela A.12–Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência MSE, a partir da imagem HR original <i>cr5210</i>	92
Tabela A.13–Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original <i>cr5210</i>	93
Tabela A.14–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR dos testes feitos com convergência baseada em PSNR, a partir da imagem HR original <i>cr5210</i>	94
Tabela A.15–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original <i>cr5210</i>	95
Tabela A.16–Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência SSIM, a partir da imagem HR original <i>cr5210</i>	95
Tabela A.17–Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original <i>cra5302</i>	96
Tabela A.18–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original <i>cra5302</i>	97
Tabela A.19–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original <i>cra5302</i>	98
Tabela A.20–Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência MSE, a partir da imagem HR original <i>cra5302</i>	98
Tabela A.21–Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original <i>cra5302</i>	99
Tabela A.22–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original <i>cra5302</i>	100
Tabela A.23–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original <i>cra5302</i>	101

Tabela A.24–Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência SSIM, a partir da imagem HR original <i>cra5302</i> . . .	101
Tabela A.25–Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original <i>crahouse</i>	102
Tabela A.26–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original <i>crahouse</i>	103
Tabela A.27–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original <i>crahouse</i>	104
Tabela A.28–Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência PSNR, a partir da imagem HR original <i>crahouse</i> . .	104
Tabela A.29–Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original <i>crahouse</i>	105
Tabela A.30–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original <i>crahouse</i>	106
Tabela A.31–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original <i>crahouse</i>	107
Tabela A.32–Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência SSIM, a partir da imagem HR original <i>crahouse</i> . . .	107
Tabela A.33–Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original <i>EIAcen120</i>	108
Tabela A.34–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR entre os testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original <i>EIAcen120</i>	109
Tabela A.35–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original <i>EIAcen120</i>	110
Tabela A.36–Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência PSNR, a partir da imagem HR original <i>EIAcen120</i> .	110
Tabela A.37–Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original <i>EIAcen120</i>	111
Tabela A.38–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR entre os testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original <i>EIAcen120</i>	112

Tabela A.39–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM entre os testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original <i>EIAcen120</i>	113
Tabela A.40–Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência SSIM, a partir da imagem HR original <i>EIAcen120</i>	113
Tabela A.41–Resultados da última iteração entre os testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original <i>lena</i>	114
Tabela A.42–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR entre os testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original <i>lena</i>	115
Tabela A.43–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original <i>lena</i>	116
Tabela A.44–Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência PSNR, a partir da imagem HR original <i>lena</i>	116
Tabela A.45–Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original <i>lena</i>	117
Tabela A.46–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR entre os testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original <i>lena</i>	118
Tabela A.47–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM entre os testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original <i>lena</i>	119
Tabela A.48–Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência SSIM, a partir da imagem HR original <i>lena</i>	119
Tabela A.49–Resultados da última iteração entre os testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original <i>boats</i>	120
Tabela A.50–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR entre os testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original <i>boats</i>	121
Tabela A.51–Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM entre os testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original <i>boats</i>	122
Tabela A.52–Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência PSNR, a partir da imagem HR original <i>boats</i>	122
Tabela A.53–Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original <i>boats</i>	123

Tabela A.54—Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR entre os testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original <i>boats</i>	124
Tabela A.55—Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM entre os testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original <i>boats</i>	125
Tabela A.56—Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência SSIM, a partir da imagem HR original <i>boats</i>	125

Lista de abreviaturas e siglas

SSIM	Índice de Similaridade Estrutural (<i>Structural Similarity Index</i>)
PSNR	Relação Sinal-Ruído de Pico (<i>Peak Signal-to-Noise Ratio</i>)
SNR	Relação Sinal-Ruído (<i>Signal-to-Noise Ratio</i>)
MSE	Erro Quadrático Médio (<i>Median Squared Error</i>)
SR	Superresolução
HR	Alta Resolução (<i>High Resolution</i>)
LR	Baixa Resolução (<i>Low Resolution</i>)
dB	Decibéis
TV	<i>Total Variation</i>
BTV	<i>Total Variation</i> Bilateral
SAR	Autorregressivo Simultâneo (<i>Simultaneous Auto Regressive</i>)
PDF	Função Densidade de Probabilidade (<i>Probability Density Function</i>)
IID	Independente e Identicamente Distribuído (<i>independent and identically distributed</i>)
EM	<i>Expectation Maximization</i>
MM	<i>Majorization Minimization</i>

Lista de símbolos

\downarrow	Subamostragem
$\langle \cdot \rangle$	Operador média
\otimes	Convolução bidimensional
j	Iteração atual, referente aos métodos iterativos de otimização
L	Quantidade de imagens de baixa resolução
M	Largura e altura da imagem de alta resolução
N	Largura e altura da imagem de baixa resolução
P	Escala da subamostragem ($P = \frac{M}{N}$)
k	Índice da imagem de baixa resolução (LR), onde $1 \leq k \leq L$
h_k	Máscara de borramento, no domínio espacial
θ_k	Ângulo de rotação do deslocamento da imagem de baixa resolução
c_k	Translação vertical do deslocamento da imagem de baixa resolução
d_k	Translação horizontal do deslocamento da imagem de baixa resolução
$x(u, v)$	Imagem de alta resolução (HR) original, no domínio espacial
$x(u', v')$	Imagem de alta resolução após rotação e translação, no domínio espacial
$y_k(a, b)$	Imagem de baixa resolução (SR), no domínio espacial
$n_k(a, b)$	Ruído aditivo, no domínio espacial
$\hat{x}(u, v)$	Imagem de alta resolução estimada
\mathbf{H}_k	Matriz de borramento (<i>Blurring</i>)
$\mathbf{C}(\mathbf{s}_k)$	Matriz de deslocamento (<i>Warping</i>)
\mathbf{A}	Matriz de subamostragem
\mathbf{B}_k	Matriz de transformação (combinação do borramento, deslocamento e subamostragem)
\mathbf{n}_k	Ruído aditivo (vetor coluna), no domínio matricial

\mathbf{y}_k	Imagem de baixa resolução (vetor coluna), no domínio matricial
\mathbf{x}	Imagem de alta resolução (vetor coluna), no domínio matricial
$\hat{\mathbf{x}}$	Imagem de alta resolução estimada (vetor coluna), no domínio matricial
ΔT	Diferença entre o tempo de execução do algoritmo proposto neste trabalho e o tempo de execução de trabalhos anteriores
Δ_{PSNR}	Diferença entre o valor PSNR do algoritmo proposto neste trabalho e o valor PSNR de trabalhos anteriores
Δ_{SSIM}	Diferença entre o valor SSIM do algoritmo proposto neste trabalho e o valor SSIM de trabalhos anteriores

Sumário

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Caracterização do Problema	29
1.2	Motivação	30
1.3	Objetivo	31
1.4	Estrutura da Dissertação	32
1.5	Normas	32
1.6	Métricas de Qualidade	33
1.6.1	PSNR	33
1.6.2	SSIM	34
2	MODELO DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS	37
2.1	Matriz de Deslocamento	38
2.2	Matriz de Borramento	39
2.3	Matriz de Subamostragem	41
2.4	Ruído Aditivo	41
3	PANORAMA BAYESIANO	43
3.1	Maximum a Posteriori - MAP	44
3.2	Modelos da <i>Priori</i>	45
3.2.1	SAR - <i>Simultaneous Autoregressive</i>	45
3.2.2	Norma - ℓ_1	45
3.2.3	TV - <i>Total Variation</i>	46
3.3	Divergência de Kullback-Leibler	46
3.4	<i>Expectation Maximization</i>	48
3.5	<i>Majorization Minimization</i>	48
3.5.1	MM aplicado à norma- ℓ_1	49
3.5.2	MM aplicado à <i>Total Variation</i>	50
3.6	Convergência	50
4	EXPERIMENTOS	57
4.1	Metodologia	57
4.2	Resultados	60
4.2.1	Análise de Casos com Perda de Velocidade	62
4.2.2	Análise de Casos com Ganho de Velocidade	64
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	77

Referências	79
ANEXO A – PLANILHAS GERADAS PELOS EXPERIMENTOS DO CAPÍTULO 4	83

1 Introdução

A resolução de uma imagem é diretamente proporcional ao nível de detalhes contidos nela. Existem várias formas de se classificar resolução: resolução de pixel, espacial, espectral, temporal e radiométrica (ZIBETTI; MAYER, 2005). Conceitua-se como resolução espacial a densidade de pixels em uma imagem, que tem como medida o número de pixels por unidade de área. No contexto deste trabalho, a resolução espacial é foco de interesse e, doravante, tratar-se-á apenas como resolução.

Os sensores modernos, responsáveis pela captura das imagens, são tipicamente construídos em matrizes bidimensionais. O tamanho do sensor - definido pela dimensão da matriz - é equivalente ao número de pixels representados por ele e, portanto, determina a resolução espacial da imagem adquirida. É possível adquirir melhores imagens com sensores de maior resolução, entretanto, isso implica na necessidade de *hardwares* mais caros e, até mesmo, inviáveis para uma determinada aplicação. Apresenta-se, portanto, a superresolução, uma solução em *software* capaz de melhorar a resolução de imagens previamente adquiridas.

A superresolução *multiframe* é uma técnica que tem o objetivo de gerar uma imagem de alta resolução (HR), a partir de várias imagens de menor resolução (imagens LR). A superresolução *singleframe* é uma variação da técnica e está focada em gerar uma imagem de alta resolução a partir de apenas uma de baixa, entretanto, não está no escopo deste trabalho. As aplicações da técnica da superresolução são tais como:

- Aquisição de uma foto de boa qualidade a partir de um vídeo. Por exemplo:
 - Identificação da face de um suspeito a partir da imagem de uma câmera de segurança que, geralmente, é de qualidade inferior ao que se é necessário para identificação de face;
 - Identificação da placa de um carro a partir de câmeras de rodovias;
- Imagens médicas, como reconstrução de imagens de tomografia;
- Melhoria de imagens adquiridas a partir de sensores eletrônicos;
- Pré-processamento de imagens para fins de reconhecimento de padrões;
- Imagens astronômicas.

A Figura 1 ilustra a capacidade de captura de sensores de aquisição. O sensor da Figura 1a é capaz de capturar 64 (8×8) pixels, enquanto o sensor da Figura 1b

captura 256 pixels (16×16). Ou seja, a imagem adquirida a partir do segundo sensor tem maior resolução. Considera-se a utilização de dois sensores sobrepostos. Se os dois sensores tiverem deslocamento múltiplo de pixels inteiros, como na Figura 1c, a aquisição não fornece informações novas de uma mesma área, mas sim outras informações de outras áreas, o que não possibilita um aumento da resolução da imagem observada. Por outro lado, uma sobreposição com deslocamento subpixel ¹ fornece informações diferentes da mesma área. Alinham-se, posteriormente, as duas imagens sobrepostas e o resultado é uma imagem que, após reconstruída, tornar-se-á em outra, de alta resolução. Isso explica, brevemente, o princípio da superresolução *multiframe* que, conclui-se, é viável para aplicações nas quais é possível adquirir várias imagens, com deslocamentos subpixel entre si, de uma mesma cena.

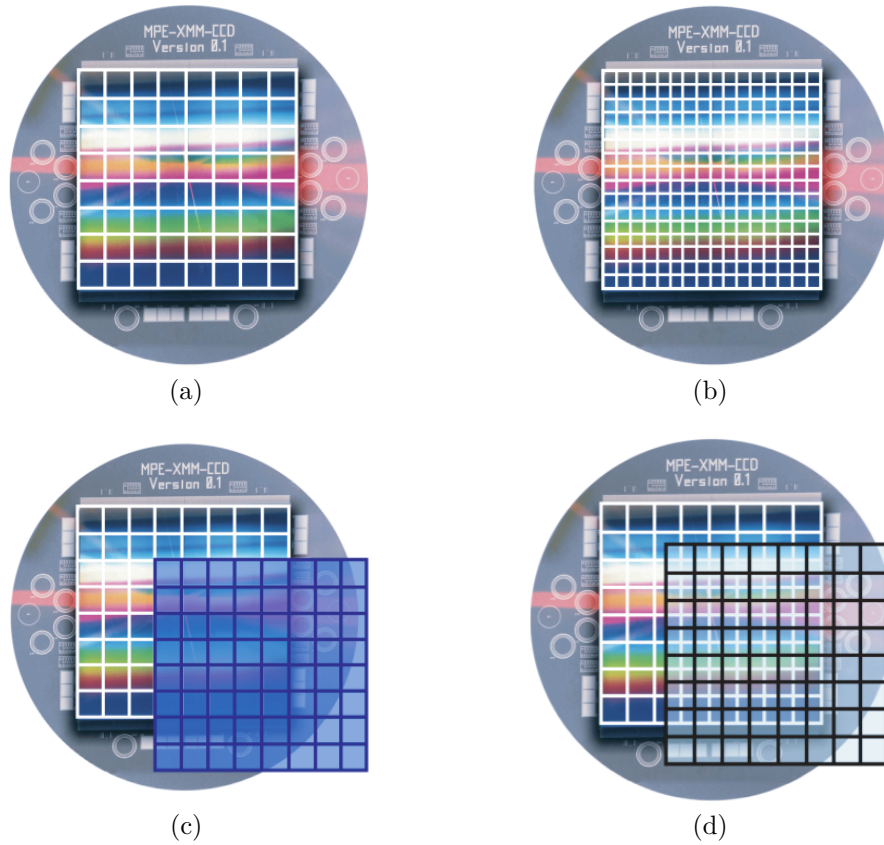


Figura 1 – Representação das matrizes bidimensionais de dois sensores de tamanhos diferentes, (a) 8×8 e (b) 16×16 . Representação das matrizes bidimensionais de dois sensores de dimensão 8×8 sobrepostos em deslocamento (c) de pixels e (d) de subpixels. (KATSAGGELOS; MOLINA; MATEOS, 2007).

A aquisição das imagens de baixa resolução pode ser feita por várias câmeras fotográficas, situadas em ângulos diferentes da cena (Figura 2a) ou a partir de *frames* consecutivos de um vídeo (Figura 2b).

¹ Deslocamento subpixel é definido por frações de pixels.

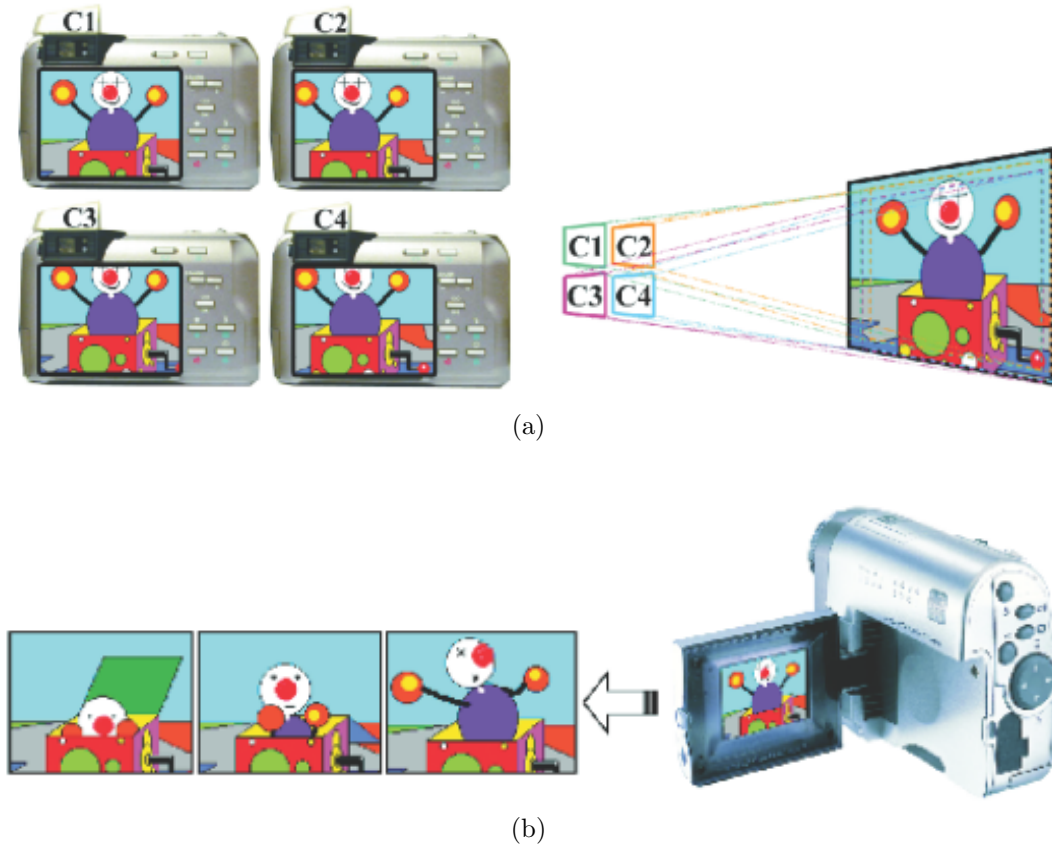


Figura 2 – Representação gráfica do processo de aquisição das imagens LR, a partir das quais uma imagem HR é produzida, através da superresolução. (a) Aquisição utilizando câmeras fotográficas e (b) aquisição utilizando câmera de vídeo. (KATSAGGELOS; MOLINA; MATEOS, 2007)

O processo de superresolução, tipicamente, é constituído de duas etapas, o registro - responsável pelo realinhamento das imagens LR - e a restauração - onde é feito o aumento da resolução da imagem. Tais etapas podem, ou não, ser executadas separadamente. O deslocamento entre as imagens LR não necessariamente é conhecido pelo algoritmo, de tal forma que torna-se necessário estimar essa variável. Quando o processo é iterativo, como é o caso a ser apresentado neste trabalho, é possível corrigir possíveis erros oriundos do registro e da estimação do deslocamento a medida em que as iterações ocorrem. E, nesses casos, o registro e a restauração são executados simultaneamente.

1.1 Caracterização do Problema

O desenvolvimento de um algoritmo de superresolução depende da formatação do modelo de aquisição de imagens, que relaciona a imagem original HR com as imagens LR observadas. A imagem original HR representa, em uma situação real, a cena capturada por uma câmera, de vídeo ou fotográfica. Além das imagens LR, o algoritmo de superresolução tem, como entrada, alguma informação acerca do sistema em questão. E, a partir daí,

gera-se a imagem melhorada - com maior resolução - chamada de imagem HR estimada.

Em uma aplicação real, o usuário tem uma determinada expectativa quanto à imagem melhorada, por exemplo, a leitura de uma placa de carro. Nesse caso, o *software* de superresolução atinge seu objetivo se for possível ler (ou segmentar, em casos automáticos) a informação esperada com sucesso. Ou seja, a qualidade da superresolução, em casos reais e isolados, é verificada por inspeção visual. Para fins de comparação de algoritmos, entretanto, é necessário utilizar uma métrica de qualidade, capaz de analisar a eficiência do método de forma objetiva e quantificada.

O problema aqui apresentado é, em resumo, formatado como na Figura 3: escolhe-se um banco de dados de imagens HR originais, transforma-se essas imagens em imagens LR observadas - utilizando o modelo de aquisição; o aperfeiçoamento da resolução das imagens LR é feito pela operação SR de forma a gerar uma imagem HR estimada, que é comparada, por fim, com a imagem HR original, por meio de uma métrica de qualidade.

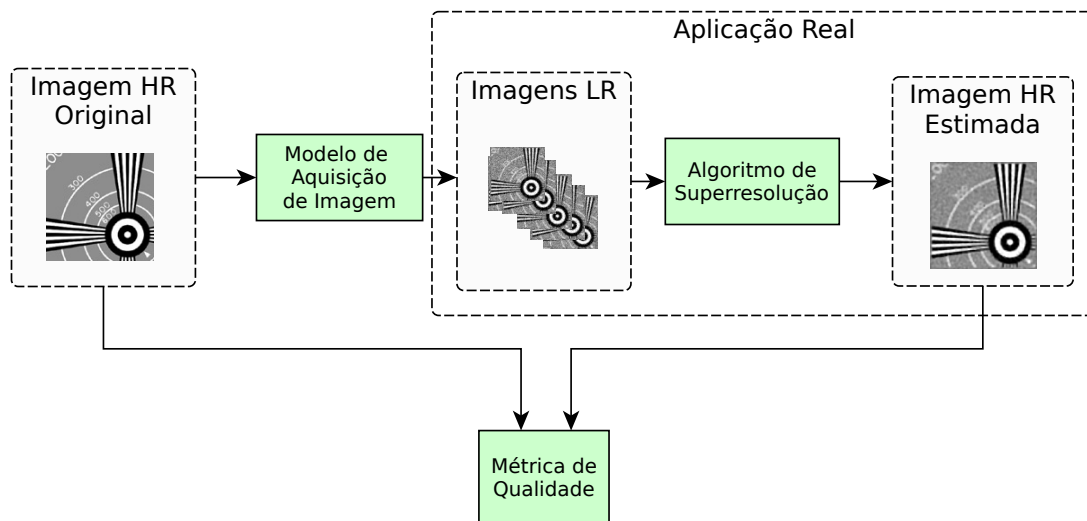


Figura 3 – Representação gráfica do problema apresentado

1.2 Motivação

A caracterização do modelo de aquisição - explicado em detalhes na Secção 2 deste trabalho - e a presença de ruído, inerente ao sistema, sugerem soluções baseadas em abordagens bayesianas, como as propostas em (CAMPONEZ, 2012), (VILLENNA, 2011), (ZIBETTI; MAYER, 2005), uma vez que as componentes relacionadas ao modelo são estatísticas. Tal natureza também se manifesta, na verdade, em problemas de restauração de imagens (PIPA, 2012), que apresentam ruído aleatório e modelo similar ao problema de superresolução. Em ambos os casos, tratam-se de problemas inversos que se tornam mal-postos devido à presença do ruído aleatório, que é amplificado pela utilização de algoritmos clássicos, como o filtro inverso.

A solução dada pela abordagem Bayesiana introduz informações sobre a imagem original esperada (*priori*), no sentido de diminuir os efeitos nocivos de um problema mal posto. Tais informações podem agir de forma a suavizar o ruído (norma- ℓ_2) ou acentuar as bordas (norma- ℓ_1). É importante ressaltar a complexidade de tratar as duas questões, dado que ruído e borda são informações semelhantes - alta variação de intensidade em uma região - e deseja-se que as duas características tenham efeitos opostos. A métrica de qualidade utilizada também pode, como a *priori*, privilegiar a eliminação do ruído (métrica PSNR - *Peak Signal-to-Noise Ratio*) ou a manutenção das bordas (métrica SSIM - *Structural Similarity Index*). Outro fator que pode influenciar no resultado é o tipo de convergência aplicado aos métodos Bayesianos variacionais, que são resolvidos por algoritmos iterativos.

Os primeiros algoritmos de superresolução baseados em abordagem bayesiana (KATSAGGELOS; MOLINA; MATEOS, 2007) utilizam *priori* baseada em norma- ℓ_2 , métrica PSNR e tem bons resultados quanto à ruído. Com o passar dos anos, outras *priori*, baseadas em norma- ℓ_1 surgiram nas literaturas, melhorando os resultados quanto à manutenção de borda. Em alguns casos inclusive, métodos que combinam os dois tipos de *priori* supracitados são apresentados. Tipicamente, quanto à convergência, verifica-se o erro médio quadrático (MSE) entre o resultado atual e o da iteração anterior. O MSE faz parte do cálculo da PSNR e, portanto, privilegia a eliminação do ruído. Nota-se uma expressiva relação entre a métrica de qualidade e a convergência.

A motivação deste trabalho origina-se da necessidade de manter as bordas, uma vez que esse tipo de informação é significativa para o usuário, que normalmente deseja identificar objetos como formas e letras.

1.3 Objetivo

Deseja-se demonstrar, por meio de testes, que a escolha de métrica MSE como controle de iteração não conduz a uma solução (imagem final) que tira o melhor proveito das *pioris* baseadas em norma ℓ_1 . Assim sendo, o objetivo deste trabalho é avaliar a medida SSIM como critério de convergência de algoritmos iterativos Bayesianos, em contraste ao tradicional uso do MSE, de modo a aperfeiçoar os resultados e melhorar aspectos da imagem.

Propõe-se utilizar algoritmos de superresolução baseados em Bayes variacional, sobretudo aqueles que utilizam *priori* baseada em norma- ℓ_1 , aplicando SSIM como métrica de qualidade e critério de convergência, obtendo algoritmos mais rápidos e com bons resultados.

As modificações realizadas foram implementadas na versão de 18 de novembro de 2011 do *software* intitulado *Superresolutionv1* desenvolvido pelo grupo de pesquisa da Uni-

versidade de Granada, na Espanha, responsável pelo projeto "*Super-resolución bayesiana de imágenes aplicada a vigilancia y seguridad*" e liderado pelo Prof. Rafael Molina. A aplicação foi obtida a partir do endereço <<http://decsai.ugr.es/pi/superresolution/software.html>> em 10 de março de 2015 e implementa os algoritmos desenvolvidos por Villena et al. (2013), Villena et al. (2009), Villena et al. (2010) e Babacan, Molina e Katsaggelos (2011).

1.4 Estrutura da Dissertação

O presente capítulo introduz a Superresolução, suas aplicações viáveis e a estrutura geral do problema. A Seção 1.6 explica como é feito o cálculo da PSNR e do SSIM, explanando suas diferenças e as vantagens do uso de cada uma das métricas. Nessa Seção, justificam-se a existência do SSIM e seu crescente uso em problemas de reconstrução e, conseqüente, Superresolução. Além disso, discutem-se a importância da avaliação da qualidade de imagens e sua relação com a percepção humana.

A construção do modelo de aquisição, ilustrado na Figura 3, é detalhada no Capítulo 2 bem como os operadores que o constituem. Destacam-se a interpolação bilinear, utilizada no operador de deslocamento, a característica esparsa e circulante das matrizes de transformação e a natureza gaussiana do ruído.

O Capítulo 3 descreve os algoritmos de Superresolução Bayesianos Variacionais que são utilizados neste trabalho. Introduzem-se, brevemente, a Regra de Bayes, o estimador MAP e a justificativa de seus usos em problemas de SR. Os modelos da *priori*, a divergência de Kullback-Leibler, e os algoritmos iterativos de otimização, *Expectation Maximization* e *Majorization Minimization*, são os principais assuntos explorados por esse capítulo que é concluído com uma discussão sobre a convergência de tais algoritmos.

Os experimentos realizados no decorrer deste trabalho de mestrado e os resultados relacionados são demonstrados e explicados no Capítulo 4, onde é possível observar o ganho em velocidade obtido pela mudança de convergência. Os testes foram feitos utilizando parte das imagens utilizadas pelos trabalhos que basearam o *software* e duas novas, comuns a outros trabalhos de Superresolução. Finalmente, o Capítulo 5 é constituído pelas conclusões do trabalho e trabalhos futuros sugeridos.

1.5 Normas

O conceito de norma é a generalização de comprimento ou magnitude. Qualquer função real de \mathbf{x} , representada por $\|\mathbf{x}\|$, pode ser definida como uma norma se tiver as seguintes propriedades (CHEN, 1995):

1. $\|\mathbf{x}\| \geq 0$ para todo \mathbf{x} e $\|\mathbf{x}\| = 0$ se, e somente se $\mathbf{x} = 0$

2. $\|\alpha \mathbf{x}\| = |\alpha| \|\mathbf{x}\|$, para qualquer α real
3. $\|\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2\| \leq \|\mathbf{x}_1\| + \|\mathbf{x}_2\|$ para todo \mathbf{x}_1 e \mathbf{x}_2 (desigualdade triangular).

Dado $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^\top$ a norma de \mathbf{x} pode ser representada por uma das equações abaixo

$$\begin{aligned}\|\mathbf{x}\|_1 &:= \sum_{i=1}^n |x_i| \\ \|\mathbf{x}\|_2 &:= \sqrt{\mathbf{x}^\top \mathbf{x}} = \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^2 \right)^{1/2} \\ \|\mathbf{x}\|_\infty &:= \max_i |x_i|\end{aligned}$$

Essas são chamadas, respectivamente, norma- ℓ_1 , norma- ℓ_2 e norma infinita.

1.6 Métricas de Qualidade

O objetivo das métricas de qualidade é comparar a imagem HR original e a HR estimada. A escolha da métrica está relacionada à sua equivalência quanto à percepção humana. Em outras palavras, deseja-se quantificar a comparação entre as imagens da mesma forma que a visão humana as compara, qualificando-as quanto a similaridade existente entre elas. Dois tipos diferentes de métrica são utilizados neste trabalho: PSNR (Relação Sinal-Ruído de Pico, do inglês, *Peak Signal-to-Noise Ratio*) e SSIM (Índice de Similaridade Estrutural, do inglês, *Structural Similarity Index*).

1.6.1 PSNR

Utilizado em muitos trabalhos nas áreas de compressão de sinal, imagem e vídeo, a PSNR é simples de calcular, mas por outro lado, não traduz numericamente a percepção humana. (SALOMON, 2004). Define-se o erro quadrático médio (MSE) entre a imagem HR estimada $\hat{\mathbf{x}}$ e a imagem HR original \mathbf{x} , aqui nas suas formas lexicográficas,

$$MSE(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}}) = \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^{M^2} [\mathbf{x}(i) - \hat{\mathbf{x}}(i)]^2, \quad (1.1)$$

que é uma medida de diferença entre pixels das duas imagens. Quanto mais próximo de zero for o valor do MSE, mais parecidas são as duas imagens, teoricamente.

O PSNR é dado por

$$PSNR(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}}) = 10 \log_{10} \left(\frac{MAX_{\mathbf{x}}^2}{MSE} \right), \quad (1.2)$$

e aumenta a medida em que as duas imagens testadas são mais parecidas uma da outra. Devido à presença do logaritmo na equação, o valor é dado em decibéis (dB). Além disso, tal métrica não tem valor absoluto, servindo apenas para comparar métodos de compressão de perda geralmente ou, como é o caso deste trabalho, métodos de reconstrução. Essa é a métrica utilizada em diversos trabalhos, tais como (VILLENNA et al., 2009), (VILLENNA, 2011), (VILLENNA et al., 2013) e (BABACAN; MOLINA; KATSAGGELOS, 2011).

1.6.2 SSIM

Durante as três últimas décadas, muitos trabalhos estiveram focados em desenvolver uma forma de avaliação de qualidade de imagens que aproveite características conhecidas do sistema visual humano (HVS - *human visual system*) (WANG et al., 2004). A maioria dos modelos desenvolvidos tem como estratégia modificar a medida MSE de forma que os erros sejam penalizados de acordo com sua visibilidade. Wang et al. (2004) desenvolve uma medida de similaridade estrutural que compara padrões locais de intensidade que são normalizados pelo luminância e pelo contraste, ilustrada na Figura 4 e definida por

$$SSIM(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}}) = \frac{(2\mu_{\mathbf{x}}\mu_{\hat{\mathbf{x}}} + c_1)(2\sigma_{\mathbf{x}\hat{\mathbf{x}}} + c_2)}{(\mu_{\mathbf{x}}^2 + \mu_{\hat{\mathbf{x}}}^2 + c_1)(\sigma_{\mathbf{x}}^2 + \sigma_{\hat{\mathbf{x}}}^2 + c_2)}, \quad (1.3)$$

onde $\mu_{\mathbf{x}}$ e $\mu_{\hat{\mathbf{x}}}$ são a média de \mathbf{x} e $\hat{\mathbf{x}}$, respectivamente. Além disso, $\sigma_{\mathbf{x}}$ e $\sigma_{\hat{\mathbf{x}}}$ representam as variâncias de \mathbf{x} e $\hat{\mathbf{x}}$, respectivamente; $\sigma_{\mathbf{x}\hat{\mathbf{x}}}$, a covariância entre os dois sinais e c_1 e c_2 são constantes que estabilizam a divisão, no caso de um denominador próximo de zero.

O valor do SSIM (*Structural Similarity Index*) varia entre -1 e 1 mas, geralmente, se encontra entre 0 e 1. Assume-se 1 o valor resultante quando duas imagens idênticas são comparadas, e 0 quando duas imagens completamente diferentes são dadas como entrada.

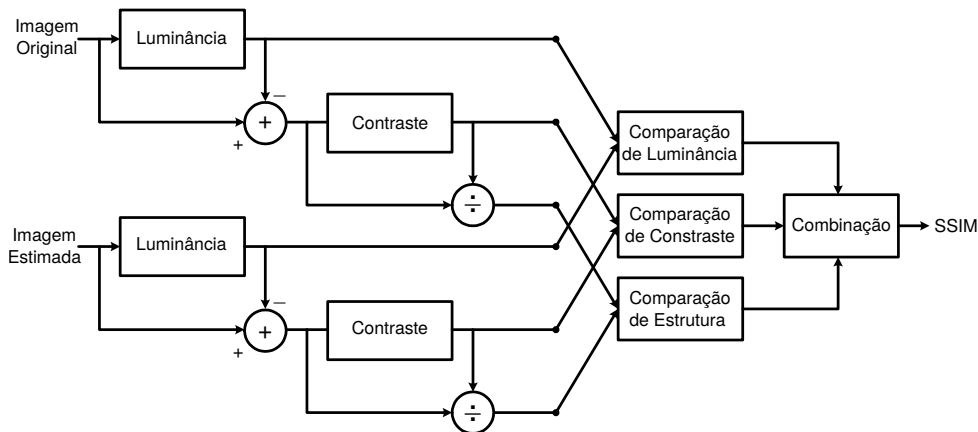


Figura 4 – Diagrama do funcionamento da medição do SSIM (Adaptado de (WANG et al., 2004))

A Figura 5 ilustra a comparação entre o MSE e o SSIM. O raio da circunferência representa o valor MSE (portanto, o mesmo PSNR), ou seja, as imagens em volta do círculo tem o mesmo MSE, quando comparadas com a imagem em seu interior. Por inspeção

visual, observa-se que a imagem no topo, à esquerda, é igual à referência e imagem na parte inferior, à direita da figura, é muito diferente da referência. O MSE, entretanto, não é capaz de traduzir tais aspectos, uma vez que, de acordo com seu valor, todas as imagem do lado exterior do círculo tem a mesma semelhança com a imagem no interior. Por outro lado, a imagem superior tem o maior SSIM e é, de fato, a imagem mais parecida com a referência.

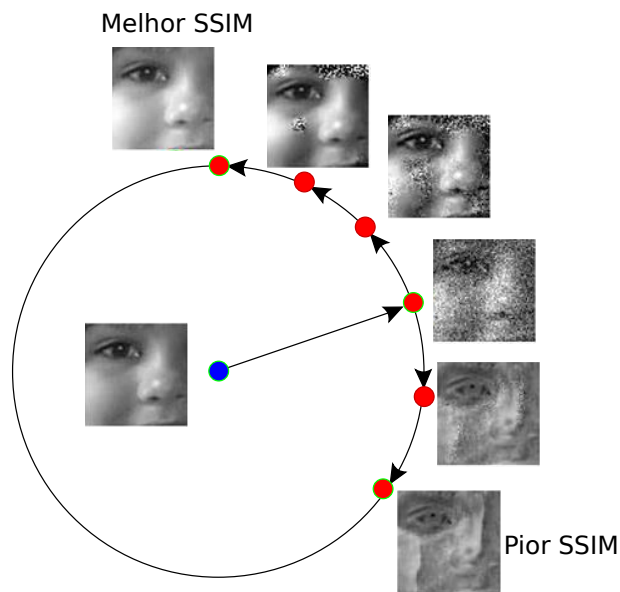


Figura 5 – Comparação ilustrativa entre o PSNR e o SSIM. Observe que todas as imagens na circunferência do círculo possuem a mesma PSNR em relação à original (Adaptado de (WANG; BOVIK, 2009)).

Ainda que o PSNR seja amplamente utilizado, esse método é focado em encontrar diferenças entre pixels, enquanto o SSIM é baseado em variações na estrutura. Entretanto, a mente humana não processa informações simplesmente como números ou divisões tão pequenas quanto pixels. Ao olhar pra uma imagem, o usuário busca informações completas, como formas e bordas, que se traduzem como estrutura. Utilizando o SSIM é possível comparar as imagens de forma semelhante à abordagem do olho humano. Nesse sentido, neste trabalho conjectura-se que a mudança da métrica PSNR para SSIM possibilita um aperfeiçoamento nos resultados de superresolução existentes. Espera-se obter imagens estimadas mais próximas à expectativa do usuário.

2 Modelo de Aquisição de Imagens

O modelo de aquisição de imagens utilizado em problemas de superresolução foi proposto pela primeira vez por [Elad e Feuer \(1997\)](#) e assumem-se três tipos de operações envolvidas em tal processo: deslocamento (*warping*), borramento (*blurring*) e subamostragem. O efeito do deslocamento é causado pela movimentação relativa entre a câmera e o objeto, ou seja, simula a movimentação entre as imagens consecutivas da mesma cena. O borramento, por sua vez, pode ser causado pela própria movimentação da câmera ou pela atmosfera entre ela e o objeto ([WANG; QI, 2004](#)).

Considerando o borramento advindo do movimento, ele ocorre após ao deslocamento. Tal consideração resulta no modelo chamado *warp-blur*. Por outro lado, o modelo *blur-warp* representa o caso no qual o borramento é causado pelo efeito da atmosfera, ocorrendo antes do deslocamento. Ainda que os dois modelos sejam coerentes com a situação real, o modelo *warp-blur* é mais fiel, uma vez que no caso da superresolução, o borramento de movimento é mais significativo. Portanto, esse é o modelo usado em ([CAMPONEZ; SALLES; SARCINELLI-FILHO, 2012](#)), ([VILLENA et al., 2013](#)) e neste trabalho.

A formulação desse modelo, representada pela Figura 6, é matricial e dada por

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{A}\mathbf{H}_k\mathbf{C}(\mathbf{s}_k)\mathbf{x} + \mathbf{n}_k, \quad (2.1)$$

onde o vetor \mathbf{x} está na forma lexicográfica ¹ e é a imagem HR original, ou seja, a representação discreta da cena contínua, obtida por amostragem sem *aliasing*. São geradas L imagens de baixa resolução, e cada uma delas é representada por um vetor \mathbf{y}_k (onde $\mathbf{k} = 1, 2, \dots, L$), também na forma lexicográfica. \mathbf{A} é a matriz de subamostragem, \mathbf{H}_k é a matriz de borramento (*blurring*), $\mathbf{C}(\mathbf{s}_k)$ é a matriz de deslocamento (ou *warping*) e \mathbf{n}_k é o ruído aditivo, sendo os três últimos referentes à imagem LR \mathbf{k} .

Considerando a imagem HR com dimensão $M \times M$ e as imagens LR de dimensão $N \times N$, as dimensões dos vetores e matrizes envolvidos na formulação são dadas de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Dimensão das matrizes e vetores presentes no modelo de aquisição

	\mathbf{x}	\mathbf{y}_k	\mathbf{n}_k	$\mathbf{C}(\mathbf{s}_k)$	\mathbf{H}_k	\mathbf{A}
Dimensão	$M^2 \times 1$	$N^2 \times 1$	$N^2 \times 1$	$M^2 \times M^2$	$M^2 \times M^2$	$N^2 \times M^2$

As matrizes de borramento, deslocamento e subamostragem são esparsas e possuem outras características interessantes, que serão exploradas na sequência.

¹ A ordenação lexicográfica consiste em transformar matrizes bidimensionais em vetores colunas, empilhando as colunas vizinhas da matriz original

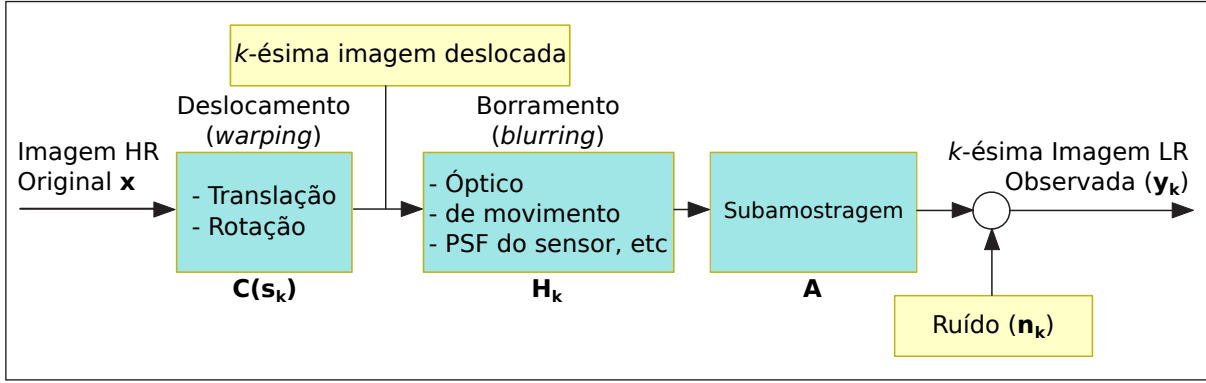


Figura 6 – Modelo de aquisição (Adaptada de (PARK; PARK; KANG, 2003))

2.1 Matriz de Deslocamento

As imagens de baixa resolução são deslocadas entre si, em frações de pixels. Esse deslocamento é causado por uma transformação bidimensional, constituída de translação e rotação, aplicada à imagem HR original. Tal transformação é dada pelas equações (HE et al., 2007)

$$x_k(u, v) = x(u', v'), \quad (2.2a)$$

onde

$$\begin{aligned} u' &= u \cos \theta_k - v \sin \theta_k + c_k \\ v' &= u \sin \theta_k + v \cos \theta_k + d_k, \end{aligned} \quad (2.2b)$$

onde θ_k é o k -ésimo ângulo de rotação, c_k e d_k são, respectivamente, os k -ésimos deslocamentos horizontal e vertical, referentes à translação. A relação é escrita, utilizando a formulação matricial, como

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{C}(\mathbf{s}_k)\mathbf{x}, \quad (2.3)$$

onde a matriz $\mathbf{C}(\mathbf{s}_k)$ representa a operação de transformação citada referente ao vetor de deslocamento $\mathbf{s}_k = [\theta_k, c_k, d_k]$. A Figura 7 mostra, em detalhe, o *grid* da imagem antes do deslocamento (em preto) e após o deslocamento (em vermelho). Observa-se que cada pixel do novo *grid* é uma combinação dos quatro vizinhos, do *grid* antigo. Como \mathbf{x}_k e \mathbf{x} são escritos na forma lexicográfica, os coeficientes da combinação que relaciona cada valor do vetor de saída com seus respectivos vizinhos no vetor de entrada estão localizados na mesma linha, do vetor de saída, da matriz de transformação $\mathbf{C}(\mathbf{s}_k)$. Ou seja, suponha o pixel de índice i , no *grid* novo, seu valor será dado por

$$x_{k_i} = \sum_{j=1}^{M^2} \mathbf{C}(\mathbf{s}_k)_{i,j} x_j. \quad (2.4)$$

Portanto, cada linha da matriz $\mathbf{C}(\mathbf{s}_k)$ tem quatro valores diferentes de zero, sendo eles os referentes aos vizinhos do pixel em questão. Reitera-se que $\mathbf{C}(\mathbf{s}_k)$ tem dimensão $M^2 \times M^2$.

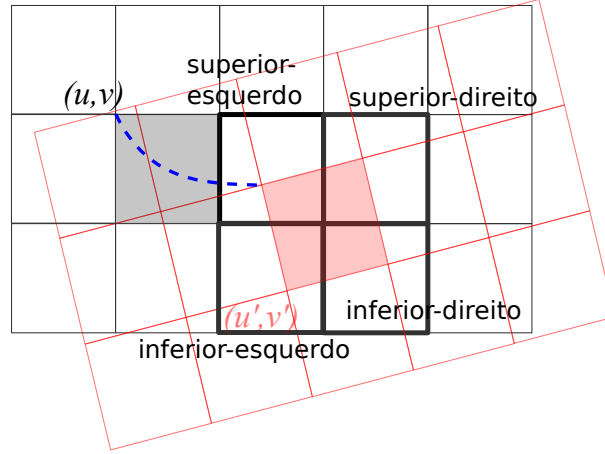


Figura 7 – Detalhe do *grid* da imagem antes do deslocamento (em preto) e após o deslocamento (em vermelho) (Adaptado de (VILLENNA et al., 2013)).

Concluindo, dessa forma, que tal matriz é esparsa, com $M^2 \cdot 4$ valores diferentes de zero e $M^2 \cdot (M^2 - 4)$ valores iguais a zero.

Os elementos da matriz $\mathbf{C}(\mathbf{s}_k)$ são calculados por Interpolação Bilinear (ZENG; YANG, 2013), utilizando a equação

$$\begin{aligned} \mathbf{C}(\mathbf{s}_k) \approx & \mathbf{D}_{\mathbf{b}_k(\mathbf{s}_k)}(\mathbf{I} - \mathbf{D}_{\mathbf{a}_k(\mathbf{s}_k)})\mathbf{L}_{\mathbf{bl}(\mathbf{s}_k)} + (\mathbf{I} - \mathbf{D}_{\mathbf{b}_k(\mathbf{s}_k)})\mathbf{D}_{\mathbf{a}_k(\mathbf{s}_k)}\mathbf{L}_{\mathbf{tr}(\mathbf{s}_k)} + \\ & (\mathbf{I} - \mathbf{D}_{\mathbf{b}_k(\mathbf{s}_k)})(\mathbf{I} - \mathbf{D}_{\mathbf{a}_k(\mathbf{s}_k)})\mathbf{L}_{\mathbf{tl}(\mathbf{s}_k)} + \mathbf{D}_{\mathbf{b}_k(\mathbf{s}_k)}\mathbf{D}_{\mathbf{a}_k(\mathbf{s}_k)}\mathbf{L}_{\mathbf{br}(\mathbf{s}_k)}, \end{aligned} \quad (2.5)$$

onde $\mathbf{D}_{\mathbf{a}_k}(\mathbf{s}_k)$ e $\mathbf{D}_{\mathbf{b}_k}(\mathbf{s}_k)$ são matrizes diagonais com os vetores $\mathbf{a}_k(\mathbf{s}_k)$ and $\mathbf{b}_k(\mathbf{s}_k)$ em suas diagonais, respectivamente. $(a_k(s_k), b_k(s_k))^T$ é a diferença entre o pixel (u', v') e o seu vizinho superior-esquerdo, no *grid* antigo (em preto), representado na Figura 7. As matrizes $L_{\mathbf{z}}$ com $\mathbf{z} \in \{\mathbf{bl}(\mathbf{s}_k), \mathbf{br}(\mathbf{s}_k), \mathbf{tl}(\mathbf{s}_k), \mathbf{tr}(\mathbf{s}_k)\}$ são construídas de forma que o produto $L_{\mathbf{z}}\mathbf{x}$ produza os pixels nas posições superior-esquerda, superior-direita, inferior-direita e inferior-esquerda do pixel (u', v') , respectivamente.

2.2 Matriz de Borramento

O borramento (do inglês, *blurring*) é causado por deformações óticas, de movimento e pela PSF (*point spread function*) do sensor. A modelagem utilizada neste trabalho considera um filtro de média aritmética, ou seja, cada pixel - na imagem corrompida - tem valor igual a média de seus vizinhos da imagem original. A aplicação de tal filtro é equivalente a uma filtragem passa-baixa no domínio da frequência, atenuando variações locais na imagem, de forma a reduzir definição de bordas. Espacialmente, o termo *máscara de borramento* também é utilizado.

No domínio espacial, a transformação pode ser escrita como a convolução bidimensional entre a imagem de entrada com a máscara de borramento, ou seja

$$x'_k = h_k \otimes x_k, \quad (2.6)$$

onde x_k é a k -ésima imagem deslocada e x'_k é a k -ésima imagem deslocada e deformada e h_k é a máscara de borrimento, de dimensão $m \times m$ com $m \ll M$. (GONZALEZ; WOODS, 2010) Como definido no início desta seção, a imagem original tem dimensão $M \times M$.

No domínio matricial, a Equação 2.6 se torna

$$\begin{aligned} \mathbf{x}'_k &= \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k \\ \mathbf{x}'_k &= \mathbf{H}_k \mathbf{C}(\mathbf{s}_k) \mathbf{x}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Como demonstrado em (JAYARAMAN; ESAKKIRAJAN; VEERAKIMA, 2009), a matriz \mathbf{H}_k é bloco circulante, construída a partir da k -ésima máscara de borrimento h_k . Supondo a dimensão da máscara 3×3 , pode-se escrevê-la como

$$h_k = \begin{bmatrix} h_{k11} & h_{k12} & h_{k13} \\ h_{k21} & h_{k22} & h_{k23} \\ h_{k31} & h_{k23} & h_{k33} \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Um bloco de dimensão $M \times M$ é construído de forma que seja circulante, a partir de cada uma das colunas da máscara de borrimento. O bloco referente à i -ésima coluna é,

$$\begin{bmatrix} h_{k2i} \\ h_{k1i} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ h_{k3i} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} h_{k2i} & h_{k3i} & 0 & 0 & h_{k1i} \\ h_{k1i} & h_{k2i} & h_{k3i} & 0 & 0 \\ 0 & h_{k1i} & h_{k2i} & h_{k3i} & 0 \\ 0 & 0 & h_{k1i} & h_{k2i} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & h_{k3i} \\ h_{k3i} & 0 & 0 & \dots & h_{k2i} \end{bmatrix} = \mathbf{H}_{ki} \quad (2.9)$$

Finalmente, a matriz \mathbf{H}_k é preenchida com os blocos referentes a todas as colunas da máscara h_k , configurando-se como uma matriz bloco circulante esparsa de dimensão $M^2 \times M^2$

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{k2} & \mathbf{H}_{k3} & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & \dots & \bar{\mathbf{0}} & \mathbf{H}_{k1} \\ \mathbf{H}_{k1} & \mathbf{H}_{k2} & \mathbf{H}_{k3} & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & \dots & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} \\ \bar{\mathbf{0}} & \mathbf{H}_{k1} & \mathbf{H}_{k2} & \mathbf{H}_{k3} & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & \dots & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} \\ \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & \mathbf{H}_{k1} & \mathbf{H}_{k2} & \mathbf{H}_{k3} & \bar{\mathbf{0}} & \dots & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} \\ \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & \mathbf{H}_{k1} & \mathbf{H}_{k2} & \mathbf{H}_{k3} & \dots & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & \dots & \mathbf{H}_{k2} & \mathbf{H}_{k3} \\ \mathbf{H}_{k3} & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & \dots & \mathbf{H}_{k1} & \mathbf{H}_{k2} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

onde $\bar{\mathbf{0}}$ é uma matriz, com elementos iguais a zero, de dimensão $M \times M$.

2.3 Matriz de Subamostragem

O operador de subamostragem (ou decimação) atua de forma a produzir imagens LR de menor dimensão do que a imagem HR original relacionada, de acordo com uma escala dada. A ausência de tal operador transformaria o problema de super-resolução em um problema de restauração de imagens. Dada uma escala $P = M/N$, define-se a matriz \mathbf{A} tal que

$$\begin{aligned} \mathbf{y}'_{\mathbf{k}} &= \mathbf{A}\mathbf{x}'_{\mathbf{k}} \\ \mathbf{y}'_{\mathbf{k}} &= \mathbf{A}\mathbf{H}_{\mathbf{k}}\mathbf{C}(\mathbf{s}_{\mathbf{k}})\mathbf{x}, \end{aligned} \quad (2.11)$$

onde a dimensão de $\mathbf{y}'_{\mathbf{k}}$ é $N^2 \times 1$ e, a dimensão de $\mathbf{x}'_{\mathbf{k}}$ é $M^2 \times 1$, $N < M$.

A Figura 8a representa uma imagem HR de dimensão 4×4 , onde os números indicam o índice de cada pixel. Dada uma escala $P = 2$, o processo de subamostragem transforma tal imagem em uma LR de dimensão 2×2 , representada pela Figura 8b, ocultando os pixels 6,8,14 e 16 da Figura 8a. Essa transformação pode ser escrita, no formato da equação 2.11, como

$$\begin{bmatrix} y'_{k_1} \\ y'_{k_2} \\ y'_{k_3} \\ y'_{k_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_{k_1} \\ x'_{k_2} \\ x'_{k_3} \\ \vdots \\ x'_{k_9} \\ x'_{k_{10}} \\ x'_{k_{11}} \\ \vdots \\ x_{k_{15}} \\ x_{k_{16}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_{k_1} \\ x'_{k_3} \\ x'_{k_9} \\ x'_{k_{11}} \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

É possível observar que a matriz \mathbf{A} possui apenas um valor diferente de zero em cada linha. Analogamente, sabe-se que esse é o formato de \mathbf{A} , para quaisquer valores de M e N . Da Tabela 1, \mathbf{A} tem dimensão $N^2 \times M^2$ e, portanto, em cada linha há apenas um valor diferente de zero e $M^2 - 1$ valores iguais a zero. Ou seja, essa matriz tem $N^2 \cdot 1$ valores diferentes de zero e $N^2 \cdot (M^2 - 1)$ valores iguais a zero, sendo uma matriz esparsa.

2.4 Ruído Aditivo

Devido ao teorema central do limite (PAPOULIS; PILLAI, 2002)), considera-se o ruído aditivo Gaussiano e branco, ou seja, com componentes IID (*independent and*

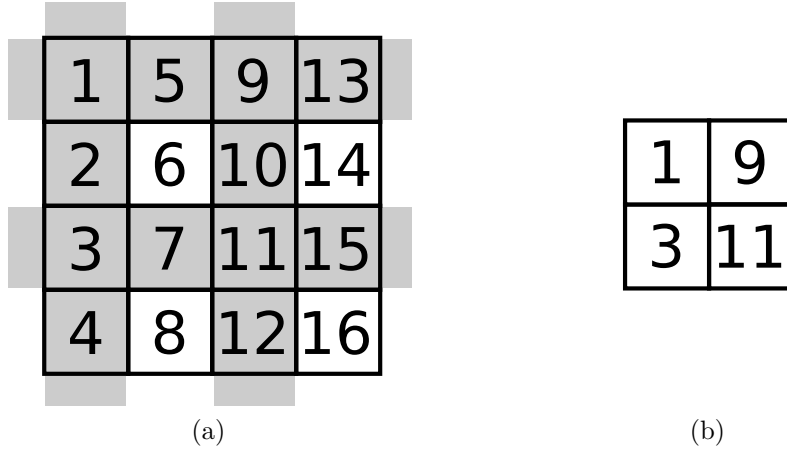


Figura 8 – Exemplo de imagens LR e HR. (a) Imagem HR com dimensão 4×4 (b) Imagem LR, após processo de subamostragem, com dimensão 2×2

identically distributed), média zero e PDF (*probability density function*) definida por

$$p(\mathbf{n}_k) = \frac{1}{\sigma_n 2\pi} e^{-\frac{\mathbf{n}_k^2}{2\sigma_n^2}}, \quad (2.13)$$

onde σ_n^2 é a variância do ruído.

A variância do ruído pode ser definida, por sua vez, pelo indicador SNR (razão sinal-ruído, do inglês, *signal-to-noise ratio*). Tal valor é dado em dB e relaciona-se com σ_n^2 segundo a equação

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left(255 \frac{\sigma_x^2}{\sigma_n^2} \right), \quad (2.14)$$

onde σ_x^2 é a variância da imagem HR original \mathbf{x} .

3 Panorama Bayesiano

O problema de superresolução é dito pertencer à classe de problemas inversos, onde a variável observada é dada e deseja-se encontrar a variável original. Existem diversas abordagens para resolver esse tipo de problema, assumindo-se tanto técnicas determinísticas como estatísticas. Técnicas estatísticas tem a propriedade de tratar melhor a contaminação por ruído, o que não é possível fazê-lo, de maneira adequada, por técnicas determinísticas (KATSAGGELOS, 1989). Em especial, a estimação Bayesiana é útil pois, a partir do conhecimento prévio do modelo da imagem de HR e das diversas imagens de LR, é possível estimar a imagem HR estimada, aproveitando-se a regra de Bayes, que declara (DUDA; HART; STORK, 2001)

$$p(\mathbf{x} | \mathbf{y}_k) = \frac{p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x})p(\mathbf{x})}{p(\mathbf{y}_k)}, \quad (3.1)$$

onde $p(\mathbf{x} | \mathbf{y}_k)$ é chamada de *posteriori*; $p(\mathbf{x})$ de *priori*; $p(\mathbf{y}_k)$ de evidência e $p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x})$ de verossimilhança.

A *posteriori* representa a PDF da imagem original HR, dada a imagem LR \mathbf{y}_k sendo, portanto, o resultado do problema inverso. A evidência, por sua vez, representa a PDF da imagem LR observada \mathbf{y}_k e pode ser escrita como

$$p(\mathbf{y}_k) = \int p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x})p(\mathbf{x})d\mathbf{x}. \quad (3.2)$$

Reescreve-se, portanto, a Equação 3.1, resultando na equação abaixo,

$$p(\mathbf{x} | \mathbf{y}_k) = \frac{p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x})p(\mathbf{x})}{\int p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x})p(\mathbf{x})d\mathbf{x}}, \quad (3.3)$$

entretanto, devido à complexidade do modelo, a Equação 3.2 é muito difícil de ser calculada, ou não pode ser expressa de forma fechada. Para contornar esse problema, Villena et al. (2009) adotaram a abordagem Bayesiana variacional hierárquica. Nessa abordagem, assume-se uma distribuição variacional $q()$, mais simples e tratável, cujos parâmetros são calculados de forma à minimizar a divergência de Kullback-Leibler entre $q()$ e a *posteriori* $p()$. Supondo que $q()$ depende de diversos parâmetros, por exemplo a, b, c e d , por conveniência, assume-se independência de modo a escrever $q(a, b, c, d) = q(a)q(b)q(c)q(d)$ pois torna tratável o problema de otimização subjacente. Em (VILLENNA et al., 2009) foi escolhida a distribuição Gamma para $q()$, que pode assumir formas diferentes, de acordo com seus parâmetros.

3.1 Maximum a Posteriori - MAP

Na abordagem MAP, a imagem HR estimada $\hat{\mathbf{x}}$ é aquela que leva a probabilidade $p(\mathbf{x} | \mathbf{y}_k)$ a seu valor máximo. Em outras palavras

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \max_{\mathbf{x}} p(\mathbf{x} | \mathbf{y}_k) \quad (3.4a)$$

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \max_{\mathbf{x}} \frac{p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x})p(\mathbf{x})}{p(\mathbf{y}_k)}, \quad (3.4b)$$

como a maximização é feita em relação a variável \mathbf{x} , o termo $p(\mathbf{y}_k)$ é suprimido da equação, nesta abordagem, resultando em

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \max_{\mathbf{x}} p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x})p(\mathbf{x}) \quad (3.5a)$$

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \max_{\mathbf{x}} [\log p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}) + \log p(\mathbf{x})] \quad (3.5b)$$

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} [-\log p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}) - \log p(\mathbf{x})] \quad (3.5c)$$

Encontrar o valor que maximiza essa relação é um desafio, entretanto, uma vez que nem todos os termos da Equação 3.1 são conhecidos. O nível de conhecimento dos termos determina como a maximização é feita, bem como sua eficácia. O termo $p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x})$ é derivado da PDF do ruído ¹, sendo definido por,

$$p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{\|\mathbf{B}_k \mathbf{x} - \mathbf{y}_k\|^2}{2\sigma_n^2} \right\}, \quad (3.6)$$

onde $\mathbf{B}_k = \mathbf{A}\mathbf{H}_k\mathbf{C}(\mathbf{s}_k)$ e tem dimensão $N^2 \times M^2$. Aplicando-se o logaritmo, tem-se

$$-\log p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}) = \frac{\|\mathbf{B}_k \mathbf{x} - \mathbf{y}_k\|^2}{2\sigma_n^2} + C_1, \quad (3.7)$$

onde C_1 é uma constante e pode ser suprimida do cálculo de minimização.

A inclusão do termo referente à *priori* na Equação 3.7 define o estimador como do tipo *Maximum a Posteriori* (MAP). Nesse caso, a minimização torna-se

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} \left[\frac{\|\mathbf{B}_k \mathbf{x} - \mathbf{y}_k\|^2}{2\sigma_n^2} - \log p(\mathbf{x}) \right], \quad (3.8)$$

onde o termo $\frac{\|\mathbf{B}_k \mathbf{x} - \mathbf{y}_k\|^2}{2\sigma_n^2}$ é chamado de fidelidade e o termo $\log p(\mathbf{x})$, de regularização.

¹ \mathbf{y}_k é relacionado com \mathbf{x} pelo modelo de aquisição, que contem ruído aditivo Gaussiano. Por transformação de variável, tem-se que a PDF $p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x})$ é do mesmo tipo que a PDF ruído, ou seja, é também uma Gaussiana.

3.2 Modelos da *Priori*

O problema em questão é inverso e mal-posto, por ser um caso de deconvolução. Ou seja, existem várias soluções possíveis. O termo a priori $p(\mathbf{x})$, introduzido em 3.1 e presente em 3.8, funciona como regularização e age para que se escolha a solução mais provável, dentre as possíveis, de acordo com um conhecimento prévio da imagem original \mathbf{x} . Dessa forma, a escolha do modelo da *priori* está ligada ao tipo de imagem representada e é descrita como uma PDF.

3.2.1 SAR - *Simultaneous Autoregressive*

O modelo estatístico SAR (*simultaneous autoregressive*), definido por Ripley (2005) foi utilizado, no contexto de SR em (MOLINA; KATSAGGELOS; MATEOS, 1999), (VILLENA, 2011) e outros trabalhos (KATSAGGELOS; MOLINA; MATEOS, 2007). Esse modelo é quadrático (ou de norma- ℓ_2) e conhecido por suavizar as estruturas de borda das imagens. Por outro lado, a eliminação do ruído é uma vantagem inerente ao SAR, descrito como,

$$p_1(\mathbf{x}|\alpha_1) \propto \alpha_1^{\frac{M^2}{2}} \exp \left\{ -\frac{\alpha_1}{2} \|\mathcal{C} \mathbf{x}\|^2 \right\}, \quad (3.9)$$

onde M é a dimensão da imagem HR, α_1 é o hiperparâmetro inerente ao modelo. \mathcal{C} é o operador laplaciano, equivalente a um filtro passa-alta mas devido a presença do termo quadrático, tem efeito suavizador (GONZALEZ; WOODS, 2010) (KATSAGGELOS; MOLINA; MATEOS, 2007). Tal operador é linear, uma vez que consiste no cálculo de derivadas segunda, que pode ser definido como uma máscara que resulta na subtração da soma dos quatro pixels vizinhos ponderados do pixel central, de forma que

$$\mathcal{C} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{4} & 0 \\ -\frac{1}{4} & 1 & -\frac{1}{4} \\ 0 & -\frac{1}{4} & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Ainda que pretende-se diminuir o ruído presente nas imagens deformadas, a preservação da estrutura de bordas também é uma característica desejável em sistemas de reconstrução e superresolução. Nesse sentido, os modelos baseados em norma- ℓ_1 são propostos em literaturas recentes, acreditando-se que sejam melhores do que o modelo SAR, baseado em norma- ℓ_2 .

3.2.2 Norma - ℓ_1

Os modelos baseados em norma- ℓ_1 dependem das diferenças de primeira ordem entre os *pixels* consecutivos, na horizontal e vertical. São apresentados, neste trabalho, dois modelos deste tipo. O primeiro deles, chamado norma- ℓ_1 , foi proposto por (FARSIU et al.,

2004) - na ocasião, com o nome de *Total Variation* bilateral (BTV) - e definido pela PDF,

$$p_2(\mathbf{x} | \alpha_2) \propto (\alpha_2^h \alpha_2^v)^{\frac{M^2}{4}} \exp \left\{ - \sum_{i=1}^{M^2} [\alpha_2^h \|\Delta_i^h(\mathbf{x})\|_1 + \alpha_2^v \|\Delta_i^v(\mathbf{x})\|_1] \right\}, \quad (3.11)$$

onde α_2^h e α_2^v são, respectivamente, os hiperparâmetros da horizontal e vertical; M é a dimensão da imagem HR e $\Delta_i^h(\mathbf{x})$ e $\Delta_i^v(\mathbf{x})$ são as diferenças de primeira ordem entre os pixels i e consecutivos, na horizontal e vertical, respectivamente. Observa-se que é possível ajustar a influência dos gradientes, vertical ou horizontal, no modelo da priori $p_2(\mathbf{x})$, devido à presença de dois hiperparâmetros. Esse modelo de *priori*, portanto, é o mais adaptativo dentre os citados aqui, no que se refere à direção dos pixels da imagem.

3.2.3 TV - *Total Variation*

Total Variation - TV é nome dado ao segundo operador baseado em norma- ℓ_1 apresentado aqui e foi utilizado em (VILLENNA et al., 2013). Também preserva bordas mas, ao contrário do modelo citado anteriormente, não é adaptativo na direção dos pixels, uma vez que contém apenas um hiperparâmetro. A PDF do modelo TV é dada por

$$p_3(\mathbf{x} | \alpha_3) \propto \alpha_3^{\frac{M^2}{2}} \exp \left\{ - \frac{\alpha_3}{2} \sum_{i=1}^{M^2} \sqrt{[\Delta_i^h(\mathbf{x})^2 + \Delta_i^v(\mathbf{x})^2]} \right\}, \quad (3.12)$$

onde α_3 é o hiperparâmetro do modelo, M é a dimensão da imagem HR e $\Delta_i^h(\mathbf{x})$ e $\Delta_i^v(\mathbf{x})$ são as diferenças de primeira ordem entre os pixels i e consecutivos, na horizontal e vertical, respectivamente.

3.3 Divergência de Kullback-Leibler

O MAP, abordado na seção 3.1, torna o problema da minimização de $p(\mathbf{x} | \mathbf{y})$ possível suprimindo o termo $p(\mathbf{y})$ da equação. A abordagem Bayesiana variacional hierárquica, por outro lado, é apresentada para que seja possível tratar o denominador - que pode ser reescrito como a integral da Equação 3.3 - de forma que mais informações sobre o problema sejam utilizadas e a estimação seja, portanto, mais precisa. A imagem original $p(\mathbf{x})$ é considerada um parâmetro e os modelos das *priori*, por sua vez, definem \mathbf{x} como função de α_1 , α_2 e α_3 . Por esse motivo, α_1 , α_2 e α_3 são considerados hiperparâmetros pela formulação inicial do problema (vide 3.9, 3.11 e 3.12) e também são descritos por PDFs. Deseja-se que essas PDFs - chamadas *hiperpriori* - sejam possíveis de calcular e que tais cálculos levem à minimização original, objetivo do problema.

A variância do ruído não é conhecida do ponto de vista do algoritmo de super-resolução, logo, também é um hiperparâmetro a ser calculado. A Equação 3.6 pode ser

reescrita, de forma a explicitar tal hiperparâmetro

$$p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}, \beta_k) = \sqrt{\frac{\beta_k}{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{\beta_k}{2} \|\mathbf{B}_k \mathbf{x} - \mathbf{y}_k\|^2 \right\}, \quad (3.13)$$

onde $\beta_k = 1/\sigma_n^2$.

Os hiperparâmetros α_l e β_k tem PDF do tipo Gamma (VILLENNA, 2011), ou seja,

$$p(\theta) = \Gamma(\theta | a_\theta^0, b_\theta^0) = \frac{(b_\theta^0)^{a_\theta^0}}{\Gamma(a_\theta^0)} \theta^{a_\theta^0-1} \exp[-b_\theta^0 \theta], \quad (3.14)$$

onde $\theta \in \{\alpha_l, \{\beta_k\} | l = 1, 2, 3, k = 1, \dots, L\}$, $\theta > 0$, $b_\theta^0 > 0$ e $a_\theta^0 > 0$. A média da distribuição é $E[\theta] = a_\theta^0/b_\theta^0$, variância, $Var[\theta] = a_\theta^0/(b_\theta^0)^2$ e L é o número de imagens LR.

Define-se o parâmetro $\Theta_l = \{\mathbf{x}, \{\beta_k\}, \alpha_l\}$, onde $l = 1, 2, 3$ e $k = 1, \dots, L$ e a distribuição conjunta (VILLENNA, 2011)

$$p_l(\Theta_l, \mathbf{y}) = p_l(\mathbf{x} | \alpha_l) p(\mathbf{y} | \mathbf{x}, \{\beta_k\}) p(\{\beta_k\}) p(\alpha_l), \quad (3.15)$$

onde $p(\mathbf{y} | \mathbf{x}) = \prod_{k=1}^L p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x})$, supondo que as imagens LR sejam estatisticamente independentes entre si, e $l = 1, 2, 3$.

Reescreve-se a Equação 3.1, incluindo os hiperparâmetros supracitados,

$$p(\Theta_l | \mathbf{y}) = \frac{p(\Theta_l, \mathbf{y})}{p(\mathbf{y})}, \text{ para } l = 1, 2, 3. \quad (3.16)$$

Proposta por Kullback e Leibler (1951), a divergência homônima calcula a diferença entre duas distribuições estatísticas e é utilizada para resolver a minimização desejada. Essa divergência é definida por,

$$\begin{aligned} C_{KL}(q(\Theta_l) || p(\Theta_l | \mathbf{y})) &= \int q(\Theta_l) \log \left(\frac{q(\Theta_l)}{p(\Theta_l, \mathbf{y})} \right) d\Theta_l \\ &= \int q(\Theta_l) \log \left(\frac{q(\Theta_l)}{p(\Theta_l | \mathbf{y})} \right) d\Theta_l + C_2 \\ &= \mathcal{M}(q(\Theta_l), \mathbf{y}) + C_2, \end{aligned} \quad (3.17)$$

e é igual a zero somente se $q(\Theta_l) = p(\Theta_l | \mathbf{y})$. Dessa forma, a minimização desejada passa a ser calculada pela minimização da divergência de Kullback-Leibler. Além disso, assume-se, como em Bishop (2006), Miskin (2000), Villena (2011) e Villena et al. (2013), que

$$q(\Theta_l) = q(\mathbf{x}, \alpha_l, \{\beta_k\}) = q(\alpha_l) q(\mathbf{x}) \prod_{k=1}^L q(\beta_k). \quad (3.18)$$

3.4 Expectation Maximization

A técnica chamada de *Expectation Maximization*(EM) (DEMPSTER; LAIRD; RUBIN, 1977) tem o objetivo de resolver problemas que envolvem estimadores como ML e MAP, a partir de um conjunto de dados incompleto. Ou seja, existem dois espaços amostrais: em um deles, as variáveis são latentes e mapeadas para o segundo espaço, cujas variáveis são efetivamente observadas e conhecidas. Tal método é constituído de duas etapas, que são chamadas neste trabalho de etapa-E (originada do inglês, *Expectation-Step*) e a etapa-M (do inglês, *Maximization-Step*), que batizam o algoritmo iterativo em questão. Sumariamente, a ideia é, a partir dos parâmetros de mapeamento da iteração atual, calcular realização da variável latente que maximiza a probabilidade (seja ela a verossimilhança ou a *posteriori*) na mesma iteração e, posteriormente, calcular os parâmetros de mapeamento que podem melhorar a maximização, a ser calculada na próxima iteração.

O problema de superresolução, com *priori* quadrática (SAR) é resolvido por meio do algoritmo EM em Villena (2011), bem como neste trabalho. Nesses contextos, entende-se a etapa-E como

$$\hat{\mathbf{x}}_j = \mathbb{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j = \text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \sum_{k=1}^L \langle \beta_k \rangle_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{y}_k, \quad (3.19)$$

onde

$$\text{cov}_{q(\mathbf{x})}^{-1}[\mathbf{x}]_j = \sum_{k=1}^L \langle \beta_k \rangle_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{B}_k + \langle \alpha_1 \rangle_j \mathcal{C}^\top \mathcal{C}; \quad (3.20)$$

E, a etapa-M como

$$\langle \alpha_1 \rangle_{j+1} = \frac{M^2 + 2a_{\alpha_1}^0}{\|\mathcal{C} \mathbb{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j\|^2 + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \mathcal{C}^\top \mathcal{C}) + 2b_{\alpha_1}^0} \quad (3.21)$$

e

$$\langle \beta_k \rangle_{j+1} = \frac{M + 2a_{\beta_k}^0}{(\|y_k - \mathbf{B}_k \mathbb{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j\|^2 + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{B}_k)) + 2b_{\beta_k}^0}, \quad (3.22)$$

onde o traço de uma matriz representa a soma dos elementos da sua diagonal principal, $\langle \cdot \rangle$ é o operador média; $a_{\alpha_1}^0$, $b_{\beta_k}^0$ são parâmetros da hiperpriori Gamma e $\mathbb{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]$ é o valor esperado de \mathbf{x} .

O critério de convergência do EM está relacionado com as diferenças entre as imagens HR estimadas de iterações consecutivas e é discutido com mais detalhes na Seção 3.6.

3.5 Majorization Minimization

O algoritmo EM é eficaz para casos em que as densidades de probabilidade envolvidas são quadráticas como a SAR, entretanto, para casos de norma- ℓ_1 , é necessário buscar outro algoritmo de minimização. Introduz-se, então, o *Majorization Minimization* (MM), proposto no contexto de *Total Variation* por (BIOUCAS-DIAS; FIGUEIREDO;

(OLIVEIRA, 2006) e extensamente discutido em (LANGE, 2004). Similarmente ao EM, trata-se de um algoritmo que substitui uma otimização complexa por uma sequência de outras mais simples, com a diferença de proporcionar mais flexibilidade na escolha das mais simples. Cada iteração consiste em resolver uma função quadrática - mesmo que a original não o seja - não necessariamente calculando sua minimização exata, mas garantindo que o processo seja sempre decrescente. Tal função quadrática é chamada de "função majorizadora" (do inglês, *majorizer function*). Assim como o EM, o critério de convergência utilizado neste algoritmo - tanto para norma- ℓ_1 e TV - está relacionado com a diferença entre as imagens HR estimadas de iterações consecutivas e é discutido com mais detalhes na Secção 3.6.

3.5.1 MM aplicado à norma- ℓ_1

Para o caso da norma- ℓ_1 , além dos parâmetros referentes à *priori* (α_2) e ao ruído ($\{\beta_k\}$), o método *Majorization Maximization* possui dois parâmetros a mais, \mathbf{w}^h e \mathbf{w}^v , inerentes à função majorizadora e relacionados às diferenças de primeira ordem horizontal e vertical, respectivamente. A estimação da imagem HR pode ser calculada como demonstrado em Villena (2011),

$$\hat{\mathbf{x}}_j = \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j = \text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \sum_{k=1}^L \langle \beta_k \rangle_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{y}_k, \quad (3.23)$$

onde

$$\text{cov}_{q(\mathbf{x})}^{-1}[\mathbf{x}]_j = \sum_{k=1}^L [\langle \beta_k \rangle \mathbf{B}_k^\top \mathbf{B}_k] + \langle \alpha_2^h \rangle \Delta^h{}^\top \mathbf{W}(\mathbf{w}^h) \Delta^h + \langle \alpha_2^v \rangle \Delta^v{}^\top \mathbf{W}(\mathbf{w}^v) \Delta^v, \quad (3.24)$$

e

$$\mathbf{W}(\mathbf{w})_{ii} = \frac{1}{\sqrt{(w_i)}}, \text{ para } i = 1, \dots, M^2 \quad (3.25)$$

com os hiperparâmetros sendo calculados por,

$$w_{i,j+1}^h = \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[(\Delta_i^h(\mathbf{x}))^2]_j = (\Delta_i^h(\mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j))^2 + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \Delta^h{}^\top \delta_i \Delta^h) \quad (3.26)$$

$$w_{i,j+1}^v = \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[(\Delta_i^v(\mathbf{x}))^2]_j = (\Delta_i^v(\mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j))^2 + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \Delta^v{}^\top \delta_i \Delta^v) \quad (3.27)$$

$$\langle \alpha_2^h \rangle_{j+1} = \frac{\frac{M^2}{4} + a_{\alpha_2^h}^0}{\sum_{i=1}^{M^2} \sqrt{w_i^h} + b_{\alpha_2^h}^0} \quad (3.28)$$

$$\langle \alpha_2^v \rangle_{j+1} = \frac{\frac{M^2}{4} + a_{\alpha_2^v}^0}{\sum_{i=1}^{M^2} \sqrt{w_i^v} + b_{\alpha_2^v}^0} \quad (3.29)$$

$$\langle \beta_k \rangle_{j+1} = \frac{M + 2a_{\beta_k}^0}{(\|\mathbf{y}_k - \mathbf{B}_k \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j\|^2 + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{B}_k)) + 2b_{\beta_k}^0}, \quad (3.30)$$

onde δ_i representa uma matriz com todos os elementos zero, exceto aquele da posição (i, i) , que vale um, o traço de uma matriz representa a soma dos elementos da sua diagonal principal, $\langle \cdot \rangle$ é o operador média e $a_{\alpha_1}^0$ e $b_{\beta_k}^0$ são parâmetros da hiperpriori Gamma e $E_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]$ é o valor esperado de \mathbf{x} .

3.5.2 MM aplicado à *Total Variation*

O cálculo da imagem estimada e dos hiperparâmetros, neste caso, são análogos aos mesmos cálculos, para o caso da norma- ℓ_1 .

$$\hat{\mathbf{x}}_j = E_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j = \text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \sum_{k=1}^L \langle \beta_k \rangle_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{y}_k, \quad (3.31)$$

$$\text{cov}_{q(\mathbf{x})}^{-1}[\mathbf{x}]_j = \sum_{k=1}^L [\langle \beta_k \rangle \mathbf{B}_k^\top \mathbf{B}_k] + \langle \alpha_3 \rangle \Delta^h{}^\top \mathbf{W}(\mathbf{w}) \Delta^h + \langle \alpha_3 \rangle \Delta^v{}^\top \mathbf{W}(\mathbf{w}) \Delta^v, \quad (3.32)$$

$$\mathbf{W}(\mathbf{w})_{ii} = \frac{1}{\sqrt{(w_i)}} \text{ para } i = 1, \dots, M^2, \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} w_{i_{j+1}} = E_{\mathbf{x}}[(\Delta_i^v(\mathbf{x}))^2 + (\Delta_i^h(\mathbf{x}))^2]_j &= (\Delta_i^v(E_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j))^2 + (\Delta_i^h(E_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j))^2 \\ &+ \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \Delta^{v^\top} \delta_i \Delta^v) \\ &+ \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \Delta^{h^\top} \delta_i \Delta^h), \end{aligned} \quad (3.34)$$

$$\langle \alpha_3 \rangle_{j+1} = \frac{\frac{M^2}{2} + a_{\alpha_3}^0}{\sum_{i=1}^{M^2} \sqrt{w_{i_j}} + b_{\alpha_3}^0}, \quad (3.35)$$

e

$$\langle \beta_k \rangle_{j+1} = \frac{M + 2a_{\beta_k}^0}{(\|y_k - \mathbf{B}_k E_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j\|^2 + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{B}_k)) + 2b_{\beta_k}^0}, \quad (3.36)$$

onde δ_i representa uma matriz com todos os elementos zero, exceto aquele da posição (i, i) , que vale um, o traço de uma matriz representa a soma dos elementos da sua diagonal principal, $\langle \cdot \rangle$ é o operador média e $a_{\alpha_1}^0$ e $b_{\beta_k}^0$ são parâmetros da hiperpriori Gamma e $E_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]$ é o valor esperado de \mathbf{x} .

3.6 Convergência

As convergências dos algoritmos EM e MM são garantidas porque as funções a serem minimizadas tem propriedade descendente, equivalentemente ao gradiente descendente (LANGE, 2004). Ainda que os algoritmos não converjam para um mínimo ótimo global, um valor próximo a esse será encontrado.

O critério de parada do algoritmo de otimização - tanto para o EM (*Expectation Maximization*) quanto para o MM (*Majorization Minimization*) - é baseado na similaridade

entre a imagem $\hat{\mathbf{x}}_j$, gerada na iteração atual, e a imagem $\hat{\mathbf{x}}_{j-1}$, gerada na iteração anterior. Destacam-se, neste contexto, a forte relação existente entre tal convergência e a métrica de qualidade escolhida entre aquelas apresentadas na Secção 1.6. Uma vez que espera-se obter uma imagem estimada $\hat{\mathbf{x}}$ bastante similar (idealmente idêntica) à original \mathbf{x} , segundo uma determinada métrica de qualidade, acredita-se que o embasamento da convergência do processo nessa mesma métrica produza os melhores resultados possíveis. Adaptam-se, portanto, as Equações 1.1 e 1.3 de forma que seus argumentos sejam a imagem estimada pela iteração atual $\hat{\mathbf{x}}_j$ e a imagem estimada pela iteração anterior $\hat{\mathbf{x}}_{j-1}$ e se verifica se seus resultados estão dentro do intervalo de confiança desejado. Ou seja, as duas possíveis condições de convergência utilizadas são, uma baseada no MSE, definida por

$$MSE(\hat{\mathbf{x}}_j, \hat{\mathbf{x}}_{j-1}) \leq 10^{-15}, \quad (3.37)$$

e outra, baseada em SSIM,

$$SSIM(\hat{\mathbf{x}}_j, \hat{\mathbf{x}}_{j-1}) \geq 9,999 \times 10^{-1}. \quad (3.38)$$

A convergência baseada em MSE (Equação 3.37) foi usada em (VILLENNA, 2011), (VILLENNA et al., 2013) e (VILLENNA et al., 2009). Neste trabalho, o uso dela se justifica para fins de comparação. Isso porque, aqui, utiliza-se a convergência baseada em SSIM, sob a crença de que essa produza melhores resultados quanto à manutenção de bordas e demais estruturas. Além disso, observa-se, na equação 1.2 que o MSE está relacionado com o cálculo do PSNR.

A Figura 9 resume, genericamente, o funcionamento dos algoritmos apresentados neste capítulo, que são descritos explicitamente nos Algoritmos 1 (*priori* SAR com convergência MSE), 2 (*priori* normal- ℓ_1 com convergência MSE), 3 (*priori* TV com convergência MSE), 4 (*priori* SAR com convergência SSIM), 5 (*priori* normal- ℓ_1 com convergência SSIM) e 6 (*priori* TV com convergência SSIM).

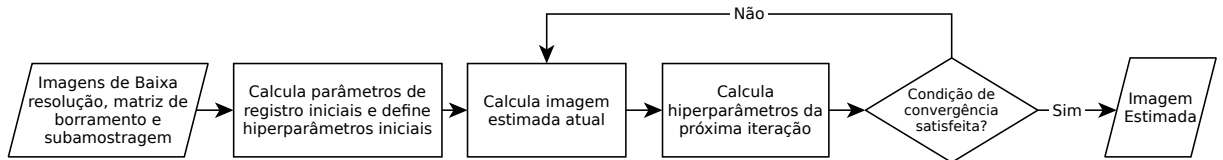


Figura 9 – Funcionamento básico de um algoritmo SR Bayesiano Variacional

Algoritmo 1: Método SR baseado em SAR, com convergência baseada em MSE, proposto por Villena (2011)

Entrada: As estimações iniciais $\hat{\mathbf{x}}_0, \alpha_{10}$ e β_{k0} , as imagens LR \mathbf{y}_k e a matriz de transformação $\mathbf{B}_k = \mathbf{A}\mathbf{H}_k\mathbf{C}(\mathbf{s}_k)$.

enquanto $MSE(\hat{\mathbf{x}}_{j-1}, \hat{\mathbf{x}}_j) / \|\hat{\mathbf{x}}_j\| \geq 1 \times 10^{-5}$ **faça**

1. $\hat{\mathbf{x}}_j = \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j = \text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \sum_{k=1}^L \langle \beta_k \rangle_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{y}_k$
2. $\text{cov}_{q(\mathbf{x})}^{-1}[\mathbf{x}]_j = \sum_{k=1}^L \langle \beta_k \rangle_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{B}_k + \langle \alpha_1 \rangle_j \mathcal{C}^\top \mathcal{C}$
3. $\langle \alpha_1 \rangle_{j+1} = \frac{M^2 + 2a_{\alpha_1}^0}{\|\mathcal{C} \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j\|^2 + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \mathcal{C}^\top \mathcal{C}) + 2b_{\alpha_1}^0}$
4. $\langle \beta_k \rangle_{j+1} = \frac{M + 2a_{\beta_k}^0}{(\|\mathbf{y}_k - \mathbf{B}_k \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j\|^2 + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{B}_k)) + 2b_{\beta_k}^0},$

fim

Saída: $\hat{\mathbf{x}} = \lim_{j \rightarrow \infty} \hat{\mathbf{x}}_j$

Algoritmo 2: Método SR baseado em ℓ_1 com convergência baseada em MSE, proposto por Villena (2011)

Entrada: As estimações iniciais $\hat{\mathbf{x}}_0, \alpha_{20}, \mathbf{w}_0^h, \mathbf{w}_0^v$ e β_{k0} , as imagens LR \mathbf{y}_k e a matriz de transformação $\mathbf{B}_k = \mathbf{A}\mathbf{H}_k\mathbf{C}(\mathbf{s}_k)$.

enquanto $MSE(\hat{\mathbf{x}}_{j-1}, \hat{\mathbf{x}}_j) / \|\hat{\mathbf{x}}_j\| \geq 1 \times 10^{-5}$ **faça**

1. $\hat{\mathbf{x}}_j = \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j = \text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \sum_{k=1}^L \langle \beta_k \rangle_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{y}_k$
2. $\text{cov}_{q(\mathbf{x})}^{-1}[\mathbf{x}]_j = \sum_{k=1}^L [\langle \beta_k \rangle_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{B}_k] + \langle \alpha_2^h \rangle_j \Delta^{h^\top} \mathbf{W}(\mathbf{w}^h) \Delta^h + \langle \alpha_2^v \rangle_j \Delta^{v^\top} \mathbf{W}(\mathbf{w}^v) \Delta^v$
3. $w_{i,j+1}^h = \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[(\Delta_i^h(\mathbf{x}))^2]_j = (\Delta_i^h(\mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j))^2 + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \Delta^{h^\top} \delta_i \Delta^h)$
4. $w_{i,j+1}^v = \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[(\Delta_i^v(\mathbf{x}))^2]_j = (\Delta_i^v(\mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j))^2 + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \Delta^{v^\top} \delta_i \Delta^v)$
5. $\langle \alpha_2^h \rangle_{j+1} = \frac{\frac{M^2}{4} + a_{\alpha_2^h}^0}{\sum_{i=1}^{M^2} \sqrt{w_i^h + b_{\alpha_2^h}^0}}$
6. $\langle \alpha_2^v \rangle_{j+1} = \frac{\frac{M^2}{4} + a_{\alpha_2^v}^0}{\sum_{i=1}^{M^2} \sqrt{w_i^v + b_{\alpha_2^v}^0}}$
7. $\langle \beta_k \rangle_{j+1} = \frac{M + 2a_{\beta_k}^0}{(\|\mathbf{y}_k - \mathbf{B}_k \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j\|^2 + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{B}_k)) + 2b_{\beta_k}^0}$

fim

Saída: $\hat{\mathbf{x}} = \lim_{j \rightarrow \infty} \hat{\mathbf{x}}_j$

Algoritmo 3: Método SR baseado em TV com convergência baseada em MSE, proposto por Villena (2011)

Entrada: As estimações iniciais $\hat{\mathbf{x}}_0, \alpha_{20}, \mathbf{w}_0^h, \mathbf{w}_0^v$ e β_{k0} , as imagens LR \mathbf{y}_k e a matriz de transformação $\mathbf{B}_k = \mathbf{A}\mathbf{H}_k\mathbf{C}(\mathbf{s}_k)$.

enquanto $MSE(\hat{\mathbf{x}}_{j-1}, \hat{\mathbf{x}}_j) / \|\hat{\mathbf{x}}_j\| \geq 1 \times 10^{-5}$ **faça**

1. $\hat{\mathbf{x}}_j = \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j = \text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \sum_{k=1}^L \langle \beta_k \rangle_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{y}_k$
2. $\text{cov}_{q(\mathbf{x})}^{-1}[\mathbf{x}]_j = \sum_{k=1}^L [\langle \beta_k \rangle \mathbf{B}_k^\top \mathbf{B}_k] + \langle \alpha_3 \rangle \Delta^h{}^\top \mathbf{W}(\mathbf{w}) \Delta^h + \langle \alpha_3 \rangle \Delta^v{}^\top \mathbf{W}(\mathbf{w}) \Delta^v$
3. $w_{i,j+1} = \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[(\Delta_i^v(\mathbf{x}))^2 + (\Delta_i^h(\mathbf{x}))^2]_j = (\Delta_i^v(\mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j))^2 + (\Delta_i^h(\mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j))^2 + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \Delta^{v^\top} \delta_i \Delta^v) + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \Delta^{h^\top} \delta_i \Delta^h)$
4. $\langle \alpha_3 \rangle_{j+1} = \frac{\frac{M^2}{2} + a_{\alpha_3}^0}{\sum_{i=1}^{M^2} \sqrt{w_{i,j} + b_{\alpha_3}^0}}$
5. $\langle \beta_k \rangle_{j+1} = \frac{M + 2a_{\beta_k}^0}{(\|\mathbf{y}_k - \mathbf{B}_k \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j\|^2 + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{B}_k)) + 2b_{\beta_k}^0}$

fim

Saída: $\hat{\mathbf{x}} = \lim_{j \rightarrow \infty} \hat{\mathbf{x}}_j$

Algoritmo 4: Método SR baseado em SAR, com convergência SSIM, proposta neste trabalho.

Entrada: As estimações iniciais $\hat{\mathbf{x}}_0, \alpha_{10}$ e β_{k0} , as imagens LR \mathbf{y}_k e a matriz de transformação $\mathbf{B}_k = \mathbf{A}\mathbf{H}_k\mathbf{C}(\mathbf{s}_k)$.

enquanto $SSIM(\hat{\mathbf{x}}_{j-1}, \hat{\mathbf{x}}_j) \leq 9,9999 \times 10^{-1}$ **faça**

1. $\hat{\mathbf{x}}_j = \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j = \text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \sum_{k=1}^L \langle \beta_k \rangle_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{y}_k$
2. $\text{cov}_{q(\mathbf{x})}^{-1}[\mathbf{x}]_j = \sum_{k=1}^L \langle \beta_k \rangle_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{B}_k + \langle \alpha_1 \rangle_j \mathbf{C}^\top \mathbf{C}$
3. $\langle \alpha_1 \rangle_{j+1} = \frac{M^2 + 2a_{\alpha_1}^0}{\|\mathbf{C} \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j\|^2 + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \mathbf{C}^\top \mathbf{C}) + 2b_{\alpha_1}^0}$
4. $\langle \beta_k \rangle_{j+1} = \frac{M + 2a_{\beta_k}^0}{(\|\mathbf{y}_k - \mathbf{B}_k \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j\|^2 + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{B}_k)) + 2b_{\beta_k}^0}$

fim

Saída: $\hat{\mathbf{x}} = \lim_{j \rightarrow \infty} \hat{\mathbf{x}}_j$

Algoritmo 5: Método SR baseado em norma- ℓ_1 , com convergência SSIM, proposta neste trabalho

Entrada: As estimações iniciais $\hat{\mathbf{x}}_0, \alpha_{20}, \mathbf{w}_0^h, \mathbf{w}_0^v$ e β_{k0} , as imagens LR \mathbf{y}_k e a matriz de transformação $\mathbf{B}_k = \mathbf{A}\mathbf{H}_k\mathbf{C}(\mathbf{s}_k)$.

enquanto $SSIM(\hat{\mathbf{x}}_{j-1}, \hat{\mathbf{x}}_j) \leq 9,9999 \times 10^{-1}$ **faça**

1. $\hat{\mathbf{x}}_j = \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j = \text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \sum_{k=1}^L \langle \beta_k \rangle_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{y}_k$
2. $\text{cov}_{q(\mathbf{x})}^{-1}[\mathbf{x}]_j = \sum_{k=1}^L [\langle \beta_k \rangle \mathbf{B}_k^\top \mathbf{B}_k] + \langle \alpha_2^h \rangle \Delta^{h^\top} \mathbf{W}(\mathbf{w}^h) \Delta^h + \langle \alpha_2^v \rangle \Delta^{v^\top} \mathbf{W}(\mathbf{w}^v) \Delta^v$
3. $w_{i_{j+1}}^h = \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[(\Delta_i^h(\mathbf{x}))^2]_j = (\Delta_i^h(\mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j))^2 + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \Delta^{h^\top} \delta_i \Delta^h)$
4. $w_{i_{j+1}}^v = \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[(\Delta_i^v(\mathbf{x}))^2]_j = (\Delta_i^v(\mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j))^2 + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \Delta^{v^\top} \delta_i \Delta^v)$
5. $\langle \alpha_2^h \rangle_{j+1} = \frac{\frac{M^2}{4} + \alpha_2^h}{\sum_{i=1}^{M^2} \sqrt{w_i^h + b_{\alpha_2^h}^0}}$
6. $\langle \alpha_2^v \rangle_{j+1} = \frac{\frac{M^2}{4} + \alpha_2^v}{\sum_{i=1}^{M^2} \sqrt{w_i^v + b_{\alpha_2^v}^0}}$
7. $\langle \beta_k \rangle_{j+1} = \frac{M + 2\alpha_{\beta_k}^0}{(\|\mathbf{y}_k - \mathbf{B}_k \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j\|^2 + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{B}_k)) + 2b_{\beta_k}^0}$

fim

Saída: $\hat{\mathbf{x}} = \lim_{j \rightarrow \infty} \hat{\mathbf{x}}_j$

Algoritmo 6: Método SR baseado em TV , com convergência SSIM, proposta neste trabalho

Entrada: As estimações iniciais $\hat{\mathbf{x}}_0, \alpha_{2_0}, \mathbf{w}_0^h, \mathbf{w}_0^v$ e β_{k_0} , as imagens LR \mathbf{y}_k e a matriz de transformação $\mathbf{B}_k = \mathbf{A}\mathbf{H}_k\mathbf{C}(\mathbf{s}_k)$.

enquanto $SSIM(\hat{\mathbf{x}}_{j-1}, \hat{\mathbf{x}}_j) \leq 9,9999 \times 10^{-1}$ **faça**

$$1. \hat{\mathbf{x}}_j = \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j = \text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \sum_{k=1}^L \langle \beta_k \rangle_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{y}_k$$

$$2. \text{cov}_{q(\mathbf{x})}^{-1}[\mathbf{x}]_j = \sum_{k=1}^L [\langle \beta_k \rangle \mathbf{B}_k^\top \mathbf{B}_k] + \langle \alpha_3 \rangle \Delta^h{}^\top \mathbf{W}(\mathbf{w}) \Delta^h + \langle \alpha_3 \rangle \Delta^v{}^\top \mathbf{W}(\mathbf{w}) \Delta^v$$

$$3. w_{i_{j+1}} = \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[(\Delta_i^v(\mathbf{x}))^2 + (\Delta_i^h(\mathbf{x}))^2]_j = (\Delta_i^v(\mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j))^2 + (\Delta_i^h(\mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j))^2 + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \Delta^v{}^\top \delta_i \Delta^v) + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \Delta^h{}^\top \delta_i \Delta^h)$$

$$4. \langle \alpha_3 \rangle_{j+1} = \frac{\frac{M^2}{2} + a_{\alpha_3}^0}{\sum_{i=1}^{M^2} \sqrt{w_{i_j} + b_{\alpha_3}^0}}$$

$$5. \langle \beta_k \rangle_{j+1} = \frac{M + 2a_{\beta_k}^0}{(\|\mathbf{y}_k - \mathbf{B}_k \mathbf{E}_{\mathbf{x}}[\mathbf{x}]_j\|^2 + \text{traço}(\text{cov}_{q(\mathbf{x})}[\mathbf{x}]_j \mathbf{B}_k^\top \mathbf{B}_k)) + 2b_{\beta_k}^0}$$

fim

Saída: $\hat{\mathbf{x}} = \lim_{j \rightarrow \infty} \hat{\mathbf{x}}_j$

4 Experimentos

A proposta deste trabalho é melhorar o o desempenho da técnica desenvolvida por Villena et al. (2013) focando no uso do SSIM enquanto métrica de qualidade e critério de convergência. A principal modificação feita neste trabalho foi no critério de convergência e os experimentos aqui mostrados tem como objetivo analisar os métodos envolvidos.

Quanto ao algoritmo SR, as variações dos testes estão no modelo da priori, no critério de convergência e na métrica de qualidade utilizada. Os testes foram realizados com as prioris SAR, ℓ_1 , TV e duas combinações: TV-SAR e ℓ_1 -SAR. Tais combinações são propostas para que seja possível utilizar as vantagens dos dois tipos de *priori* e a ponderação de cada uma delas é definida por um parâmetro λ . Em Villena (2011), uma análise dos resultados obtidos por diferentes valores de λ é feita. Uma vez que o objetivo deste trabalho é analisar a influência da convergência, um único valor de tal ponderação foi escolhido e utilizado em todos os testes que envolvem as *priori* combinadas. Utilizou-se $\lambda = 0,85$. As equações abaixo definem as *priori* formadas pelas combinações

$$p_{TV-SAR} = \lambda p_{TV} + (1 - \lambda) p_{SAR} \quad (4.1)$$

$$p_{\ell_1-SAR} = \lambda p_{\ell_1} + (1 - \lambda) p_{SAR} \quad (4.2)$$

A convergência é baseada em SSIM ou MSE. Para o primeiro caso, o critério de parada é $SSIM(\hat{x}_i, \hat{x}_{i-1}) > 9,9999 \times 10^{-1}$. Para o segundo caso, o critério é $MSE(\hat{x}_i, \hat{x}_{i-1}) / \|\hat{x}_{i-1}\|^2 < 1 \times 10^{-5}$. As comparações são feitas, basicamente, entre os resultados gerados pelos dois tipos de critério de convergência.

4.1 Metodologia

O conjunto utilizado neste experimento é formado por imagens utilizadas em (VILLENNA, 2011), (VILLENNA et al., 2013) e (CAMPONEZ, 2012) e está representado na Figura 10.

Para cada imagem HR original gera-se conjuntos de cinco imagens LR - deslocadas entre si. Quanto ao ruído aditivo modifica-se o valor SNR - que define a variância do ruído - entre 25,07 dB, 29,07 dB, 34,07 dB, 39,07 dB, 44,07 dB, 49,07 dB, 54,07 dB e 64,07 dB. Ou seja, para uma imagem HR original são gerados oito conjuntos, de cinco imagens LR cada, com potências de ruído diferentes.

A máscara de borrimento tem dimensão 3×3 , com todos os seus elementos iguais a $1/9$, e é a mesma para todas as imagens LR geradas. O deslocamento entre as imagens LR



Figura 10 – Conjunto de imagens HR originais utilizadas nos experimentos descritos no Capítulo 4, extensões dos arquivos dimensões respectivas. (a) *cartao* (png, 120×120), (b) *cr5210* (png, 128×128), (c) *cra5302* (png, 128×128), (d) *crahouse* (png, 128×128), (e) *EIAcen120* (png, 120×120), (f) *lena* (png, 128×128) and (g) *boats* (tif, 256×256).

do mesmo conjunto é definido por $\theta_k = [0^\circ \ 3^\circ \ -3^\circ \ 5^\circ \ -5^\circ]$, $c_k = [0 \ 0 \ 0,5 \ 1 \ 0]$ e $d_k = [0 \ 0,5 \ 0 \ 0 \ 1]$. Os vetores θ_k , c_k e d_k tem dimensão 1×5 , ou seja, $k = 1, 2, 3, 4, 5$ e, por isso, gera-se 5 imagens LR por conjunto. Para os diferentes conjuntos de cinco imagens LR, o mesmo deslocamento e borramento são aplicados, a única diferença está na potência do ruído. Ressalta-se que a potência do ruído é definida pela sua variância que, por sua vez, é definida pelo valor SNR. Além disso, é importante salientar que tais definições (de deslocamento, borramento e ruído) dizem respeito à transformação das imagens HR em imagens LR, ou seja, ao modelo de aquisição. Obtêm-se, então, os 8 conjuntos de imagens LR (um para cada potência de ruído) para cada imagem HR original, e esses conjuntos são usados como entrada pelos algoritmos SR testados.

Quanto ao processo de superresolução efetivamente, os experimentos foram executados para 5 tipos de algoritmos, um para cada *priori* (SAR, ℓ_1 , TV, TVSAR e ℓ_1 SAR). Para cada imagem HR original, 40 pares de simulação são executadas - 8 potências de ruído \times 5 *priori* possíveis - e cada par tem uma simulação para cada tipo de convergência. Em cada simulação duas imagens HR estimadas são geradas, de acordo com a métrica de qualidade escolhida, aquela com o maior valor PSNR entre ela e a imagem HR original e aquela com o maior valor SSIM entre ela e a imagem HR original. Ou seja, para cada par de simulação, 4 imagens HR estimadas são geradas. E, portanto, 160 (40×4) imagens HR estimadas foram geradas para cada imagem HR original, para cada bateria de 40 pares de simulações.

Finalmente, duas planilhas são geradas para cada bateria de 40 pares de simulações feitas sobre a mesma imagem HR original - uma planilha refere-se às simulações que utilizaram convergência MSE e a outra planilha, às simulações que utilizaram convergência SSIM. Em tais planilhas tem-se os valores de PSNR, SSIM e MSE entre as melhores imagens - quanto a SSIM e MSE - e a HR original; os valores PSNR, SSIM e MSE entre a imagem HR estimada na última iteração e a HR original; o tempo total de cada simulação; o número total de iterações por simulação; e as iterações das quais foram originadas as duas melhores imagens. Cada bateria de simulações foi executada 5 vezes, o que possibilitou medidas estatísticas (média e desvio padrão) dos valores registrados e resultou em 800 (160×5) imagens HR estimadas, por imagem HR original. É importante ressaltar, acerca da última iteração, que seus valores importantes são o número da iteração e o tempo de processamento, que definem os valores totais de cada medida. Por esse motivo, a imagem referente a tal iteração não foi gerada.

Para cada imagem HR original, 10 planilhas foram obtidas: 5 para as baterias de simulação que utilizam convergência SSIM e outras 5 para aquelas que utilizam convergência baseada em MSE. Tais registros numéricos foram combinados em uma nova planilha por imagem HR original, calculando as médias e desvios padrão entre os 5 valores - um de cada bateria - equivalentes entre si. As planilhas com os valores estatísticos, médias e desvios

padrões, podem ser encontradas no Anexo A, divididas em 4 tabelas cada para fins de melhor visualização. As 10 planilhas originais, com os valores brutos oriundos das simulações, foram suprimidas deste documento por serem muito extensas, mas podem ser encontradas no endereço <<https://sites.google.com/site/multiframe-super-resolution/dissertacao>>. Além disso, as imagens apresentadas aqui estão acompanhadas dos valores referentes, retirados das 10 planilhas originais. Ou seja, as medidas estatísticas servem para dar robustez às análises gerais feitas aqui. Mas, para efeito de comparação pontual entre os casos, os valores brutos são resgatados. No total, foram executadas 1400 pares de simulações (40 pares de simulações \times 5 baterias por imagem original \times 7 imagens originais).

Em resumo, cada simulação tem como entradas um conjunto de 5 imagens LR (com determinado SNR e imagem HR original), a matriz de borramento \mathbf{H}_k (3×3 com todos valores iguais a $1/9$, $\forall k = 1 \dots 5$) e o fator de escala $P = 2$ (razão entre as dimensões da imagem HR e da imagem LR). Quanto à superresolução, definem-se o tipo de *priori* (SAR, ℓ_1 , TV, TV-SAR ou ℓ_1 -SAR) e o tipo de convergência (MSE ou SSIM). Registram-se os valores de PNSR, SSIM, MSE, tempo de processamento e número de iterações. Por fim, como saída, duas imagens são geradas de acordo com a métrica de qualidade, uma com melhor PSNR e outra com melhor SSIM.

As comparações feitas neste trabalho baseiam-se no tipo de convergência e no tipo de métrica de qualidade utilizadas. Todos os testes foram realizados empregando-se um computador Core i5 com 4 Gbytes de RAM, placa de vídeo *off-board* GeForce GTX 550 Ti, o *software* Matlab versão R2014a e o sistema operacional Ubuntu 14.04.2 LTS.

4.2 Resultados

Entre os resultados expostos por esse teste destacam-se, quanto à convergência SSIM em detrimento à convergência baseada em MSE: a redução do número de iterações necessárias para convergir e o ganho em termos de velocidade e qualidade. Além disso, a diferença, estimada pelo aspecto visual, entre as imagens tidas como melhores segundo o PSNR e o SSIM e a coerência entre o uso da convergência SSIM e os métodos SR que utilizam normas não quadráticas (norma ℓ_1 e TV) são ressaltadas.

O número de iterações necessárias para que o método termine é, em média, 30,2% menor, quando o critério de convergência utilizado é o SSIM. Ou seja, apesar do cálculo do índice SSIM ser mais complexo do que o cálculo do valor MSE, os testes que utilizam o primeiro foram mais rápidos. O número médio de iterações de cada simulação pode ser observado nas quartas colunas das Tabelas A.1, A.5, A.9, A.13, A.17, A.21, A.25, A.29, A.33, A.37, A.41, A.45, A.49 e A.53.

O tempo médio de execução por simulação diminui, como pode ser observado na Tabela 2, na faixa da 18% a 36%. Os gráficos presentes nas Figuras 16 a 22, registram o

tempo médio de execução das simulações. Tais informações estão presentes, também, nas Tabelas A.52, A.56, A.12, A.16, A.20, A.24, A.28, A.32, A.36, A.40, A.44, A.48, A.52 e A.56, mas observando os gráficos a melhora no tempo de processamento é mais evidente. O eixo das abcissas representa a *priori* do algoritmo SR e a SNR das imagens LR utilizadas. O eixo das ordenadas, por sua vez, tem como valor o tempo de execução, em segundos. As curvas de coloração rosa com marcadores losangulares são referentes aos resultados dos métodos SR para convergência SSIM e as curvas de coloração verde com marcadores circulares são referentes aos resultados dos métodos SR quando a convergência MSE é utilizada. É pertinente observar que, para a imagem *boats* o tempo médio é superior, o que pode ser explicado por sua dimensão - 256×256 , contra 128×128 e 120×120 das outras imagens originais. Além disso no geral, o tempo de execução do algoritmo aumenta na medida de que a potência de ruído (ou seja, maior SNR) diminui.

Tabela 2 – Tempo médio de execução por simulação (em segundos) e diferença de tempos médios de execução (ΔT) por simulação, em segundos e porcentagem.

Imagem Original	Convergência MSE		Convergência SSIM		ΔT	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Segundos	%
<i>cartao</i>	148,41	106,59	116,25	99,65	32,16	21,67
<i>cr5210</i>	207,97	148,55	153,10	115,51	54,87	26,38
<i>cra5302</i>	276,83	200,27	215,61	166,41	61,22	22,11
<i>crahouse</i>	184,65	124,04	150,44	108,53	34,21	18,53
<i>EIAcen120</i>	135,08	93,12	89,73	66,84	45,35	33,57
<i>lena</i>	199,27	124,58	146,64	96,13	52,63	26,41
<i>boats</i>	706,18	444,17	455,43	313,47	250,75	35,51

As três últimas colunas da Tabela 3 mostram a porcentagem de ocorrências nas quais observa-se aprimoramento no tempo de execução. Tais valores comprovam o ganho de velocidade adquirido devido à mudança do critério de convergência. As seis primeiras colunas da mesma tabela, por sua vez, mostram as ocorrências nas quais houve melhora na qualidade das imagens geradas. Os cálculos foram feitos comparando-se a imagem com o melhor PSNR do primeiro tipo de convergência (baseada em MSE) e a imagem com o melhor PSNR do segundo tipo de convergência (baseada em SSIM) e, similarmente, comparou-se a imagem com o melhor SSIM do primeiro tipo de convergência com a imagem com o melhor SSIM do segundo tipo. A expectativa inicial, embasada na teoria, era de que a mudança da convergência privilegiaria exclusivamente a métrica SSIM. Entretanto, os números obtidos não demonstraram esse comportamento, apresentando melhora para as duas métricas.

Tabela 3 – Porcentagem dos casos nos quais houve aprimoramento das métricas de qualidade (PSNR e SSIM) e no tempo de execução

Imagem	PSNR (%)			SSIM (%)			Tempo de Execução (%)		
	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
<i>cartao</i>	22,5	40,5	55,0	37,5	46,0	52,5	80,0	95,0	100
<i>cra5210</i>	25,0	32,0	40,0	30,0	38,5	50,0	100	100	100
<i>cr5302</i>	2,5	30,0	40,0	15,0	25,0	32,5	100	100	100
<i>crahouse</i>	40,0	56,0	62,5	35,0	50,0	72,5	100	100	100
<i>EIAcen120</i>	32,5	44,0	55,0	42,5	49,5	55,0	85,0	91,5	95,0
<i>lena</i>	22,5	32,5	37,5	20,0	41,5	52,5	97,5	99,0	100
<i>boats</i>	22,5	37,5	57,5	7,5	32,5	45,0	100	100	100

4.2.1 Análise de Casos com Perda de Velocidade

Entre os 1400 pares de simulações executadas, a mudança na convergência causou perda de velocidade em 29 casos, ou seja, 2% do total. Dentre eles, 22 apresentaram melhoria em ambas as métricas, 2 apresentaram melhoria para a métrica SSIM, 2 obtiveram melhor PSNR e 3 não obtiveram melhoria. Nesta seção, analisa-se alguns desses casos.

A Figura 11 e a Tabela 4 apresentam os resultados para um dos casos com atraso na execução ($\Delta T = 192,57s$) e melhoria nas duas métricas ($\Delta_{PSNR} = 13,41$ dB e $\Delta_{SSIM} = 0,0433$). Observa-se que as imagens obtidas pela convergência SSIM, ou seja, as Figuras 11e e 11f possuem menos artefatos e fenômenos de *ringing* nas bordas, em oposição às Figuras 11c e 11d. As Figuras 11g a 11j mostram em detalhe, o numeral 2 pequeno, localizado à direita das imagens. Observa-se que a mudança da convergência torna tal numeral visível.

Tabela 4 – Resultados referentes às Figura 11c a 11f, obtidas por um algoritmo SR ℓ_1 -SAR, aplicado a cinco imagens LR com SNR = 44,07 dB.

Convergência	Melhor PSNR					Melhor SSIM					Total de Iterações	Tempo
	Fig.	It.	PSNR	MSE	SSIM	Fig.	It.	PSNR	MSE	SSIM		
MSE	11c	30	23,64	4,3E-3	0,9445	11d	30	23,64	4,3E-3	0,9445	30	80,08 s
SSIM	11e	74	37,05	2,0E-4	0,9817	11f	38	34,67	3,3E-4	0,9878	74	272,65 s

O caso com maior ΔT - de valor 254,36 s - gerou imagens com melhor definição de borda, quando comparadas às geradas pela convergência baseada em MSE. Os valores referentes às imagens geradas estão registrados na Tabela 5. O ruído, nesse caso, tem SNR = 64,07 dB. Em termos de métrica de qualidade, o algoritmo com convergência SSIM tem melhores resultados, com $\Delta_{PSNR} = 25,4527dB$ e $\Delta_{SSIM} = 0,0944$. Tais valores positivos confirmam a análise por inspeção visual das Figuras 12c-12j. As duas primeiras (Figuras 12c e 12d) tem bordas mais suavizadas do que as duas últimas (Figuras 12e e 12f), onde é possível distinguir os números presentes na imagem.

Na terceira situação a ser analisada, cujos valores podem ser encontrados na Tabela 6, a convergência SSIM obteve resultados quantitativamente piores, quanto às métricas de

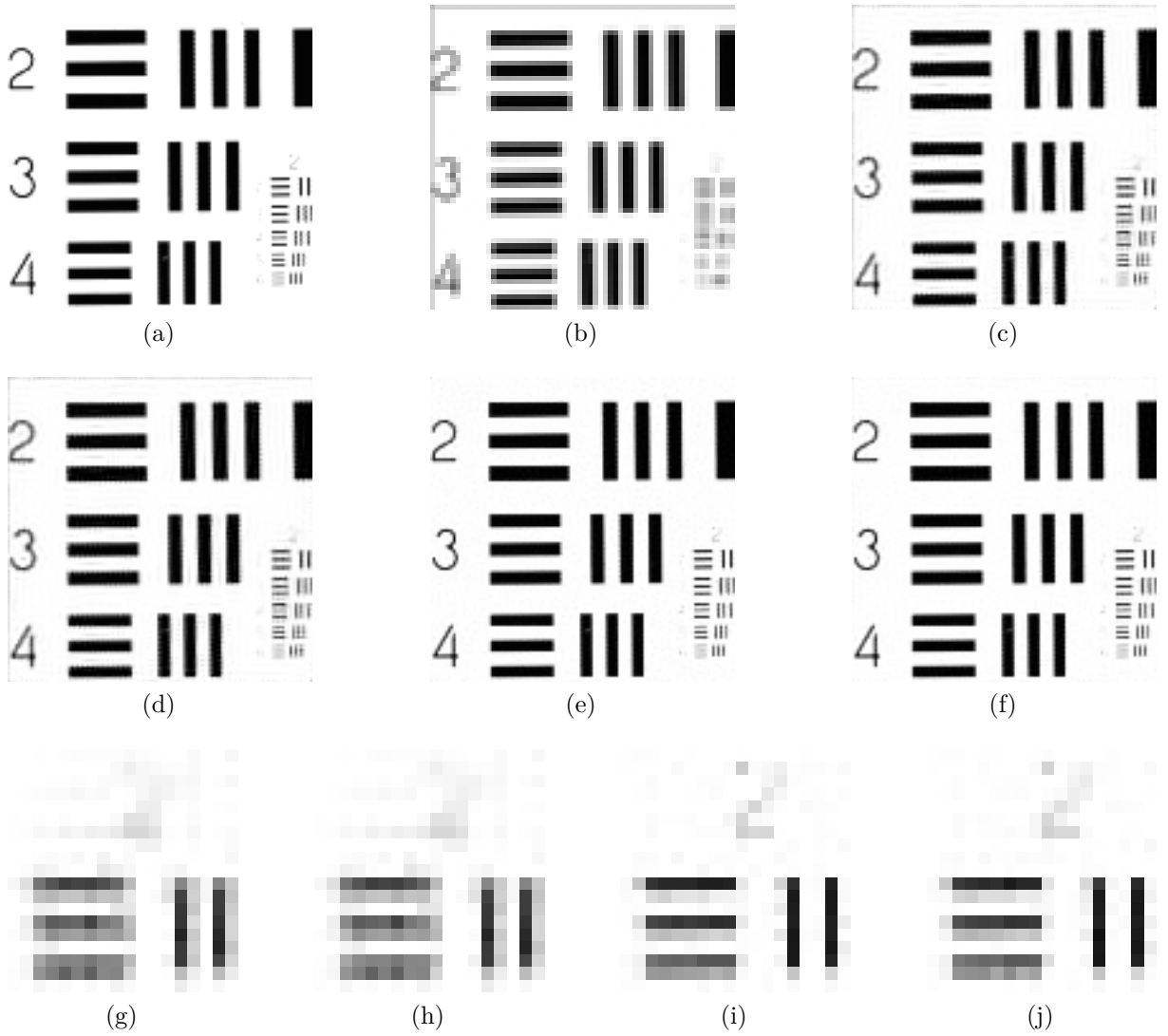


Figura 11 – (a) Imagem Original *cartao*, (b) um das cinco imagens LR relacionadas, para $SNR = 44,07$ dB e resultados das simulações usando método SR ℓ_1 -SAR além de convergência e métrica de qualidade, respectivamente, (c) MSE e PSNR, (d) MSE e SSIM, (e) SSIM e PSNR, e (f) SSIM e SSIM. (g) Detalhes das Figuras 11c, (h) 11d, (i) 11e e (j) 11f

qualidades, além do atraso no tempo. Nesse caso, $\Delta T = 42,37s$, $\Delta_{PSNR} = -0,0726dB$ e $\Delta_{SSIM} = -0,0005$. No entanto, a queda dos valores referentes às métricas iniciais foi de, 0,21% e 0,05% para o PSNR e SSIM, respectivamente. Além disso, visualmente não é possível observar tal piora, como pode-se analisar pela Figura 13. Em termos visuais, no geral, algoritmos que utilizam a *priori* SAR - como nessa situação - não são tão influenciados pela mudança de convergência quanto quando há presença das *priori* não-quadráticas, ou seja, norma ℓ_1 e TV.

Tabela 5 – Resultados referentes às Figura 12c a 12f, obtidas por um algoritmo SR baseado TV, aplicado a cinco imagens LR com SNR = 64,07 dB.

Convergência	Melhor PSNR					Melhor SSIM					Total de Iterações	Tempo
	Fig.	It.	PSNR	MSE	SSIM	Fig.	It.	PSNR	MSE	SSIM		
MSE	12c	3	21,54	7,0E-3	0,9048	12d	3	21,54	7,0E-3	0,9048	25	63,98 s
SSIM	12e	104	46,99	2,0E-5	0,9991	12f	96	46,47	2,3E-5	0,9992	106	318,34 s

Tabela 6 – Resultados referentes às Figura 13c a 13f, obtidas por um algoritmo SR baseado em SAR, aplicado a cinco imagens LR com SNR = 49,07 dB.

Convergência	Melhor PSNR					Melhor SSIM					Total de Iterações	Tempo
	Fig.	It.	PSNR	MSE	SSIM	Fig.	It.	PSNR	MSE	SSIM		
MSE	13c	85	35,18	3,0E-4	0,9597	13d	61	34,29	3,7E-4	0,9681	106	281,72
SSIM	13e	83	35,10	3,1E-4	0,9593	13f	61	34,25	3,8E-4	0,9676	97	324,09

4.2.2 Análise de Casos com Ganho de Velocidade

No caso demonstrado na Figura 14, um ganho de velocidade de 28,26 % foi obtido, além de aperfeiçoamento na qualidade, quanto às duas métricas. Os valores de PSNR e SSIM da Tabela 7, mostram que a melhoria foi relativamente pequena (0,44% para PSNR e 0,18% para SSIM) entretanto, o alto ganho de velocidade justifica o uso da convergência proposta neste trabalho. Além disso percebe-se que o uso do SSIM como métrica de qualidade proporciona uma imagem mais nítida, com regiões homogêneas menos ruidosas, como mostrado nos detalhes, nas Imagens 14c a 14f.

Tabela 7 – Resultados referentes às Figura 14c a 14f, obtidas por um algoritmo SR baseado em ℓ_1 -SAR, aplicado a cinco imagens LR com SNR = 29,07 dB.

Convergência	Melhor PSNR					Melhor SSIM					Total de Iterações	Tempo
	Fig.	It.	PSNR	MSE	SSIM	Fig.	It.	PSNR	MSE	SSIM		
MSE	14c	3	30,48	8,9E-4	0,9121	14d	2	29,73	1,1E-3	0,9182	12	40,13 s
SSIM	14e	3	30,62	8,7E-4	0,9127	14f	2	29,99	1,0E-3	0,9199	9	28,79

Em alguns casos, como no da Figura 15, o ganho em velocidade é grande (81,44%, neste caso) mas perde-se qualidade. Da Tabela 8, calculam-se as variações de PSNR e de SSIM, devido à mudança da convergência. Tem-se $\Delta_{PSNR} = -14,26\text{dB} = -30,35\%$ e $\Delta_{SSIM} = -0,043 = -4,32\%$. Observa-se que as Imagens 15e e 15f são, de fato, piores do que as Imagens 15c e 15d, uma vez que há artefatos de borda nas duas primeiras. Apesar disso, em todos os casos a palavra “LACOR” está legível - ainda que um pouco menos nos casos de convergência SSIM - o que, junto ao alto ganho em velocidade e uma vez que se trata de um tempo de processamento elevado (23,76 minutos para convergência MSE e 4,41 minutos para a SSIM), pode justificar o uso da convergência SSIM em detrimento àquela baseada em MSE.

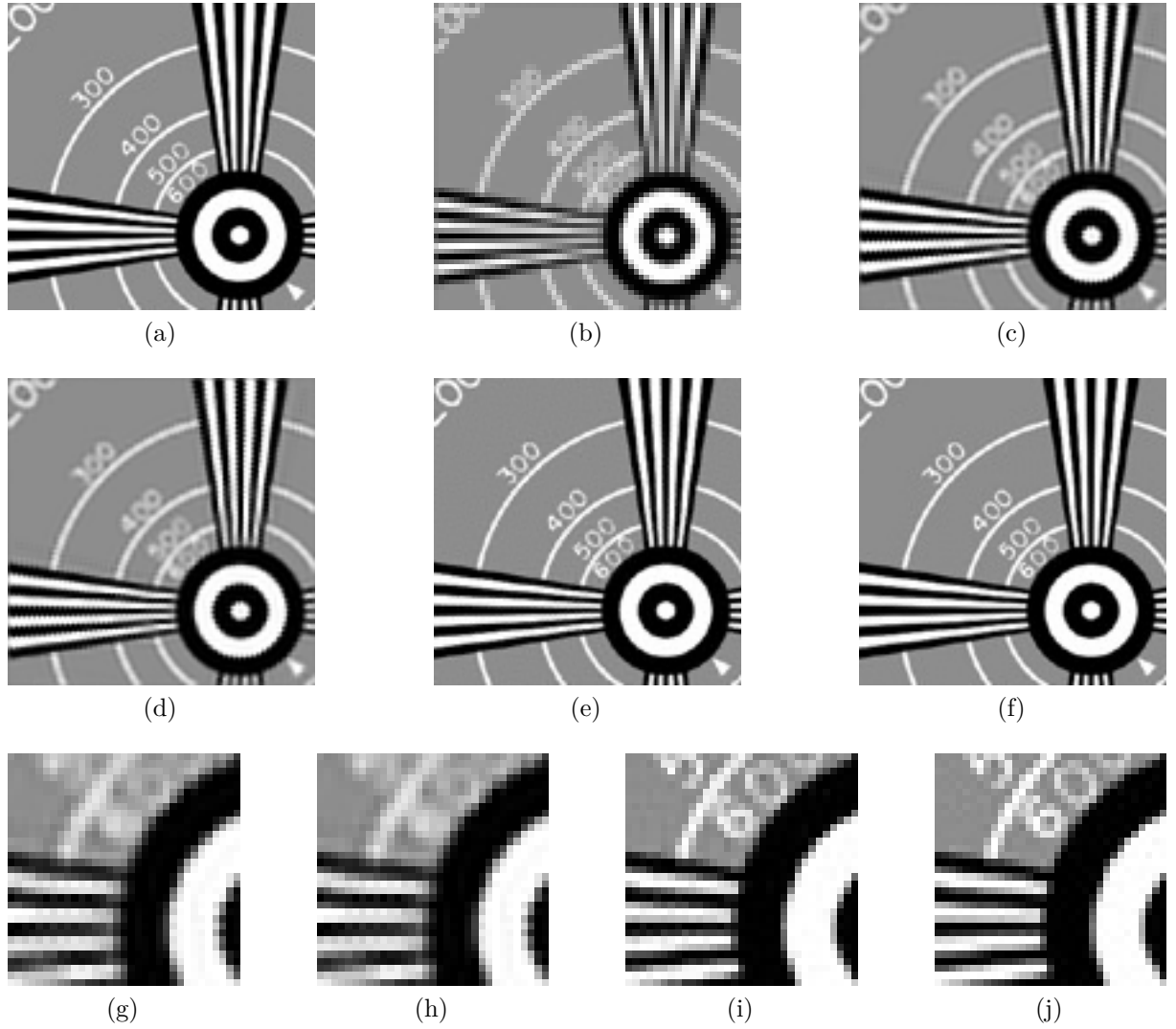


Figura 12 – (a) Imagem Original *EIAcen120*, (b) uma das cinco imagens LR relacionadas, para $\text{SNR} = 64,07$ dB e resultados das simulações usando método SR TV além de convergência e métrica de qualidade, respectivamente, (c) MSE e PSNR, (d) MSE e SSIM, (e) SSIM e PSNR, (f) SSIM e SSIM. (g) Detalhes das Figuras 12c, (h) 12d, (i) 12e e (j) 12f

Tabela 8 – Resultados referentes às Figura 15c a 15f, obtidas por um algoritmo SR baseado em ℓ_1 , aplicado a cinco imagens LR com $\text{SNR} = 54,07$ dB.

Convergência	Melhor PSNR					Melhor SSIM					Total de Iterações	Tempo
	Fig.	It.	PSNR	MSE	SSIM	Fig.	It.	PSNR	MSE	SSIM		
MSE	15c	89	46,97	2,0E-5	0,9972	15d	79	46,90	2,0E-5	0,9973	112	1425,71 s
SSIM	15e	4	32,71	5,4E-4	0,9511	15f	21	32,18	6,0E-4	0,9542	21	264,58 s

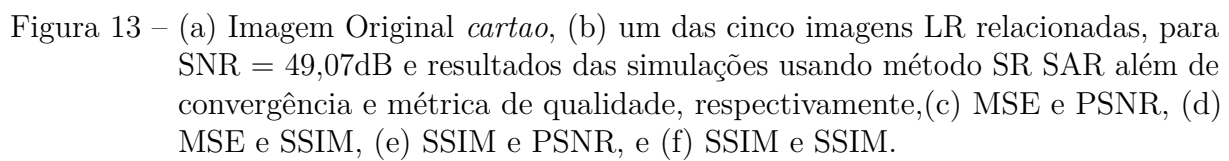




Figura 14 – (a) Imagem Original *lena*, (b) um das cinco imagens LR relacionadas, para $\text{SNR} = 29,07\text{dB}$ e resultados das simulações usando método $\text{SR } \ell_1\text{-SAR}$ além de convergência e métrica de qualidade, respectivamente, (c) MSE e PSNR, (d) MSE e SSIM, (e) SSIM e PSNR, e (f) SSIM e SSIM. (g) Detalhes das Figuras 14c, (h) 14d, (i) 14e e (j) 14f

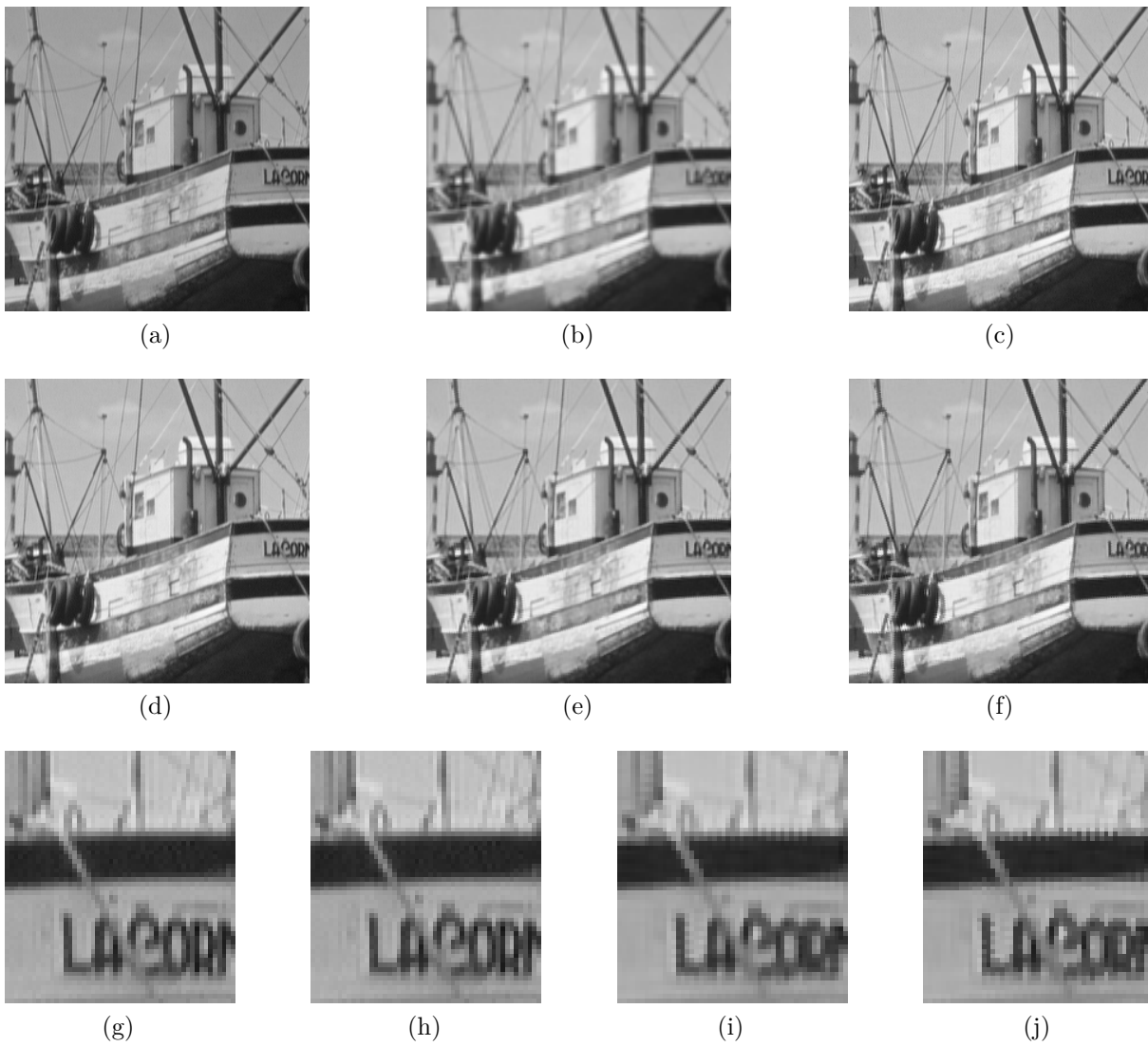


Figura 15 – (a) Imagem Original *boats*, (b) um das cinco imagens LR relacionadas, para $\text{SNR} = 54,07\text{dB}$ e resultados das simulações usando método $\text{SR } \ell_1$ além de convergência e métrica de qualidade, respectivamente, (c) MSE e PSNR, (d) MSE e SSIM, (e) SSIM e PSNR, e (f) SSIM e SSIM. (g) Detalhes das Figuras 15c, (h) 15d, (i) 15e e (j) 15f

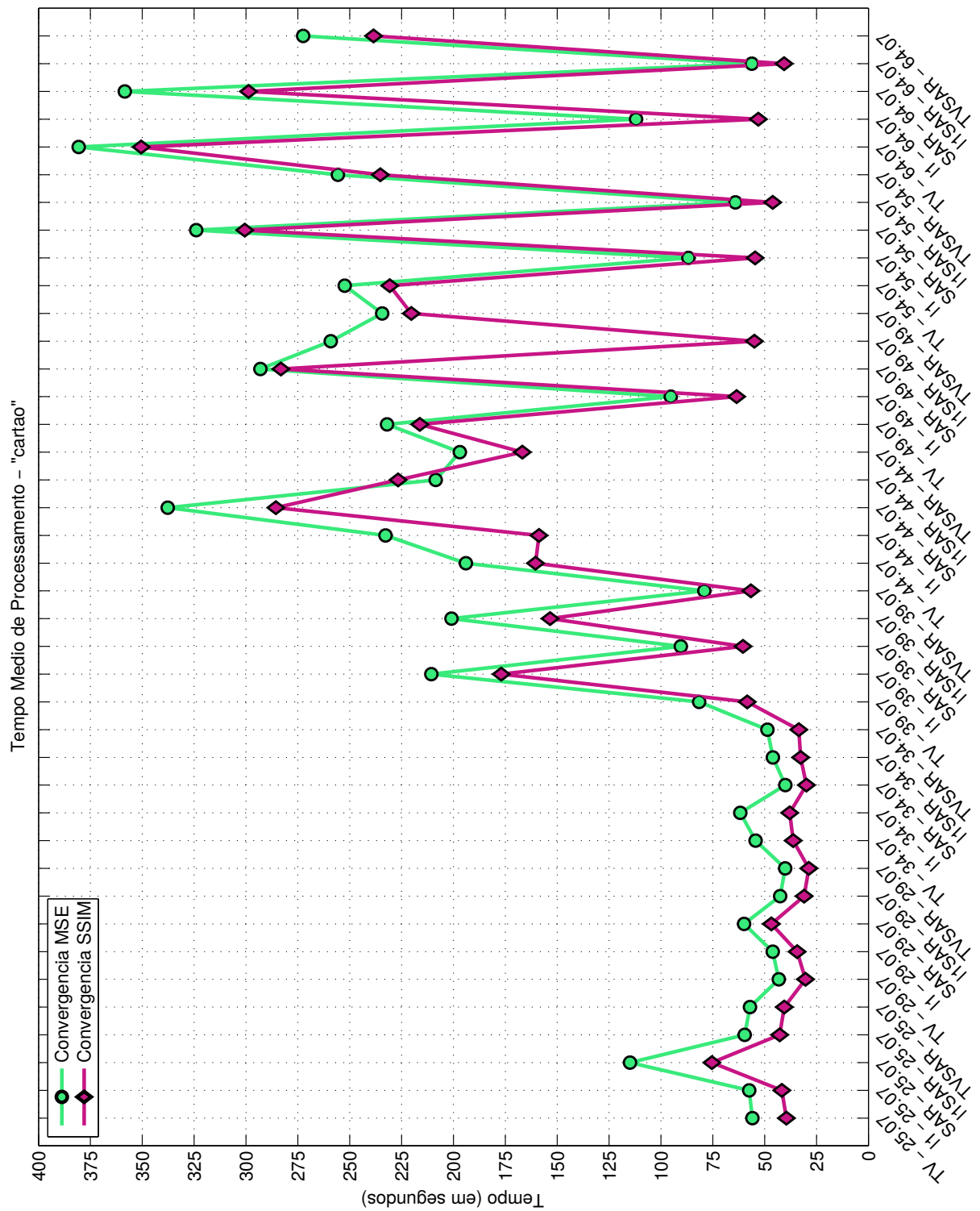


Figura 16 – Gráfico dos tempos médios de processamento dos métodos de Superresolução, aplicados à imagem *cartao*. Em verde com marcador em círculo, os casos com convergência MSE e, em rosa com marcador em losango, os casos com convergência SSIM.

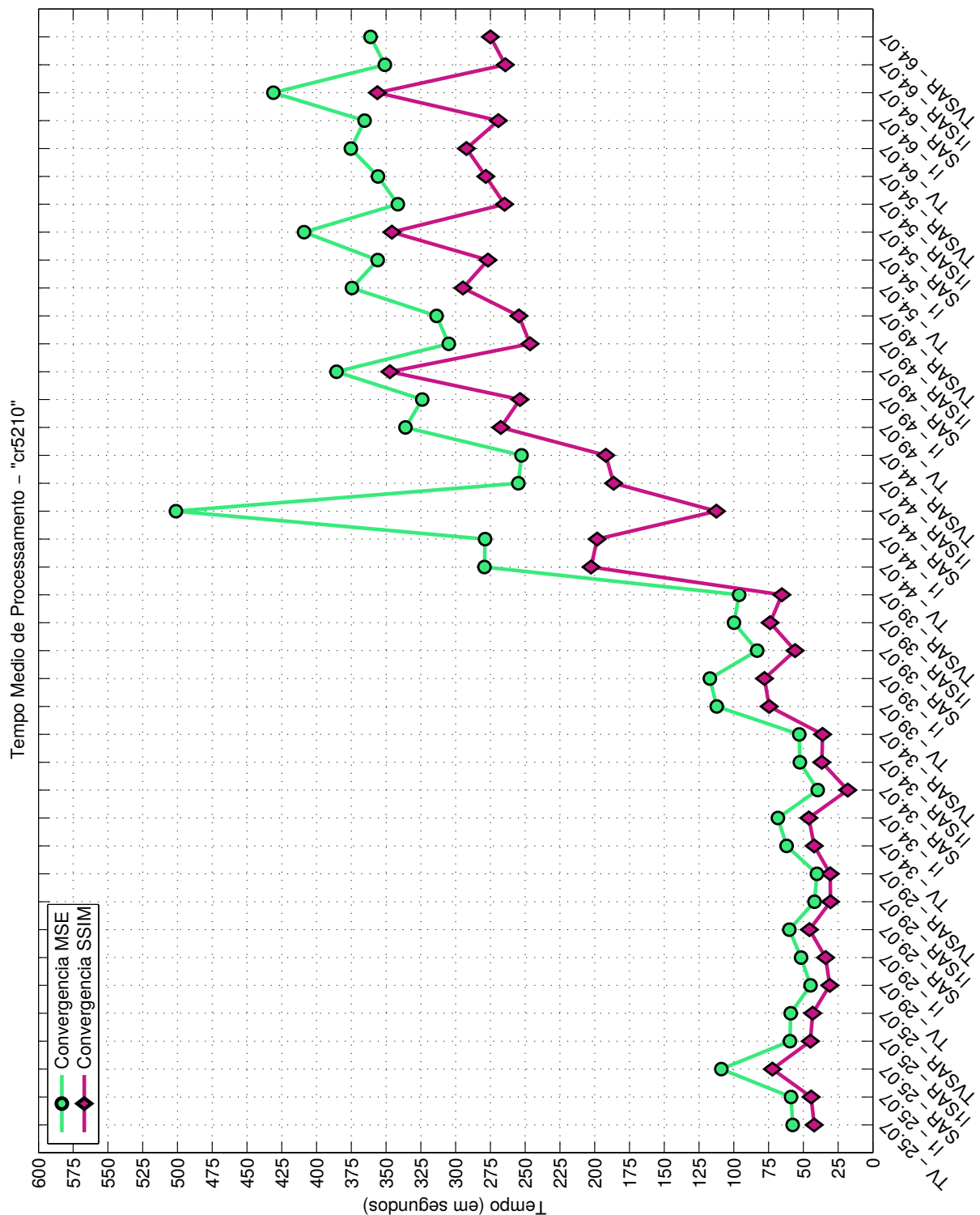


Figura 17 – Gráfico dos tempos médios de processamento dos métodos de Superresolução, aplicados à imagem *cr5210*. Em verde com marcador em círculo, os casos com convergência MSE e, em rosa com marcador em losango, os casos com convergência SSIM.

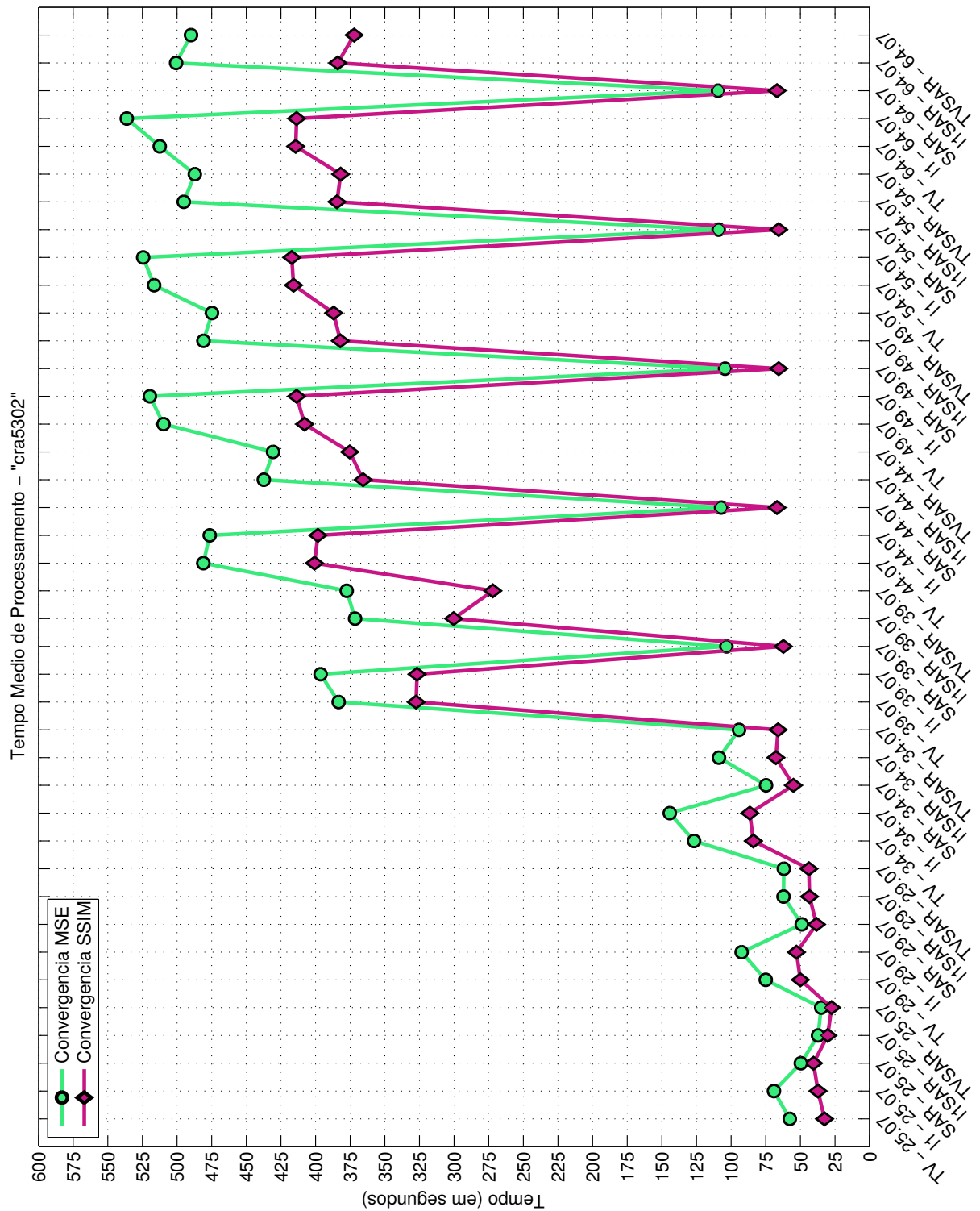


Figura 18 – Gráfico dos tempos médios de processamento dos métodos de Superresolução, aplicados à imagem *cra5302*. Em verde com marcador em círculo, os casos com convergência MSE e, em rosa com marcador em losango, os casos com convergência SSIM.

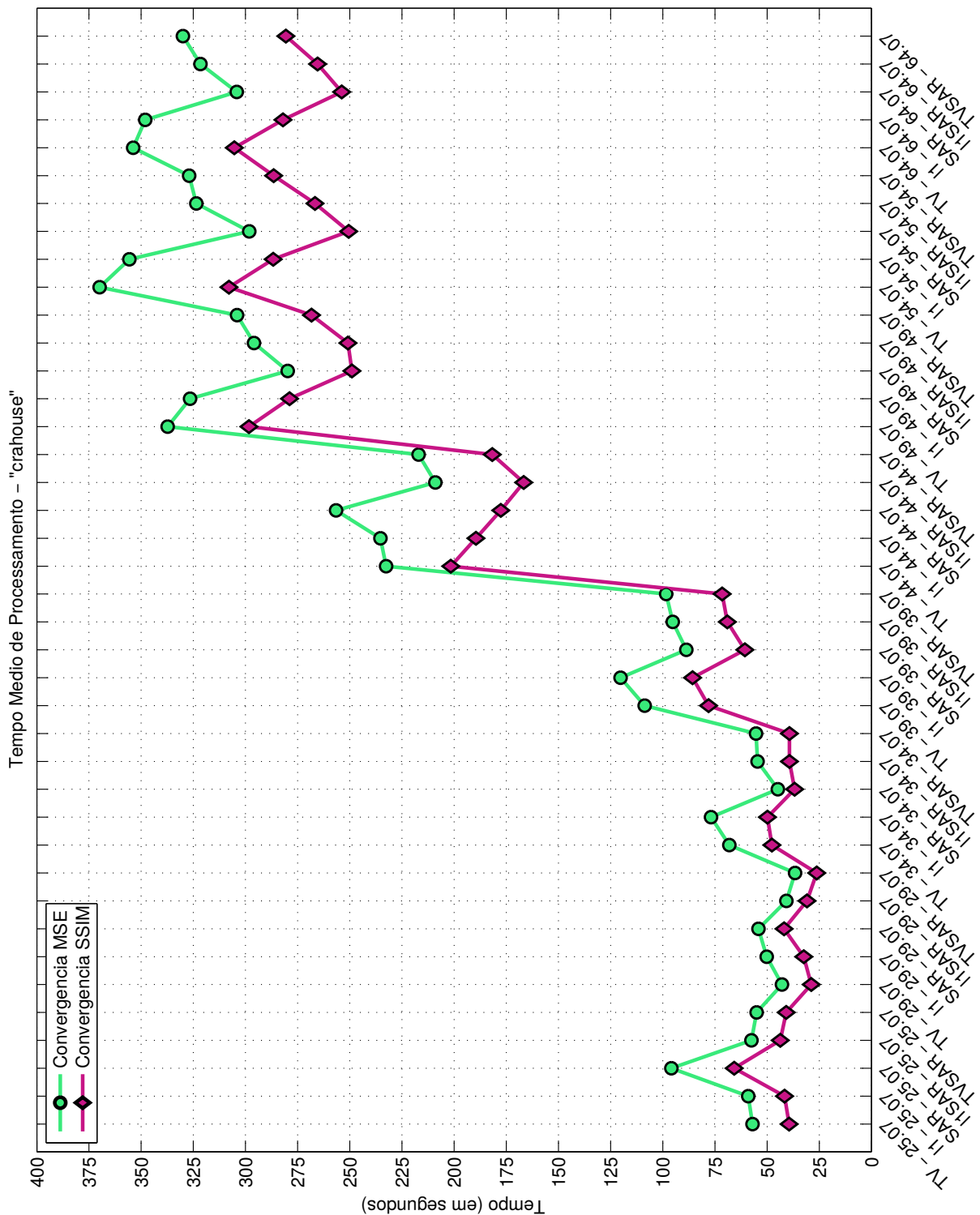


Figura 19 – Gráfico dos tempos médios de processamento dos métodos de Superresolução, aplicados à imagem *crahouse*. Em verde com marcador em círculo, os casos com convergência MSE e, em rosa com marcador em losango, os casos com convergência SSIM.

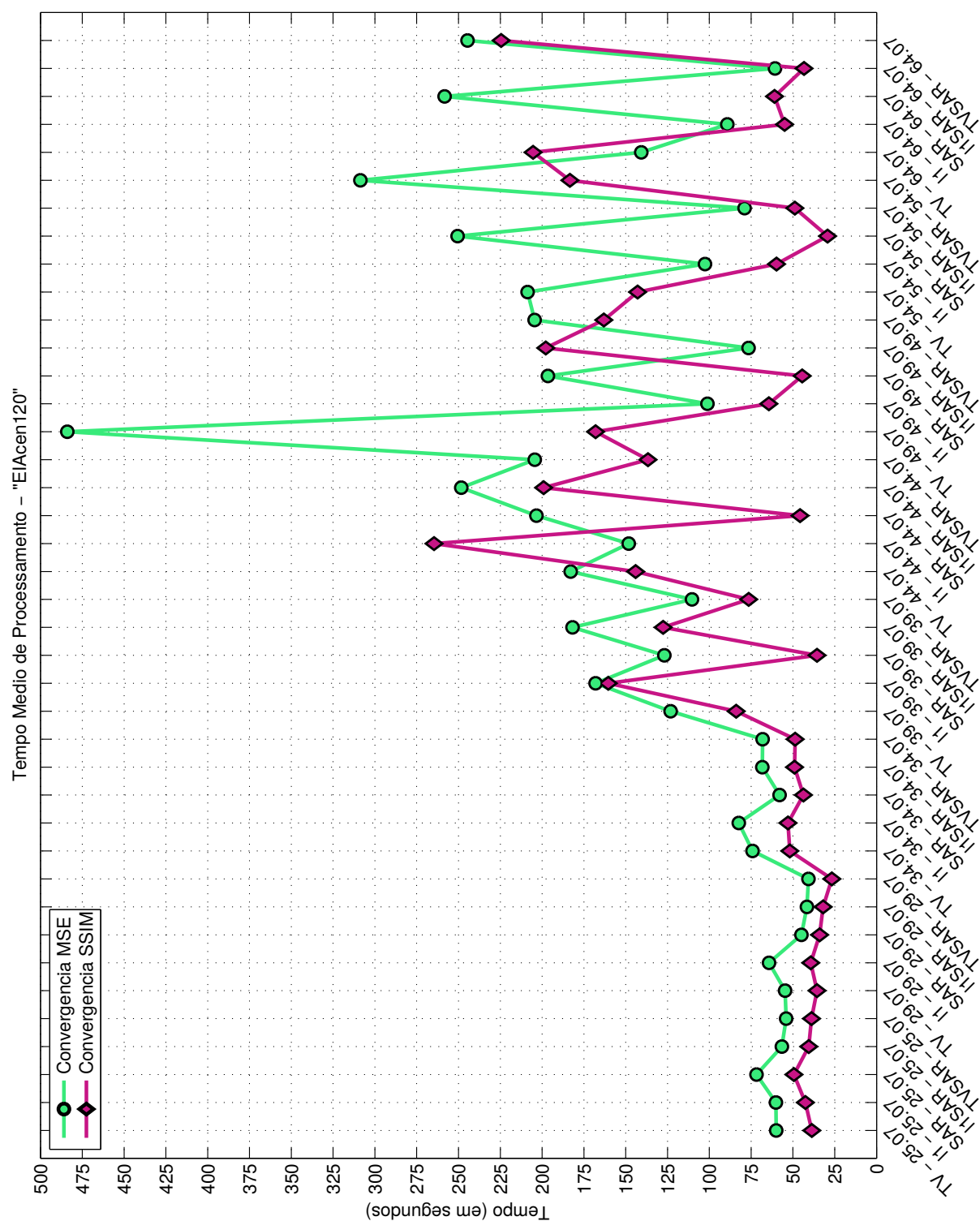


Figura 20 – Gráfico dos tempos médios de processamento dos métodos de Superresolução, aplicados à imagem *EIAcen120*. Em verde com marcador em círculo, os casos com convergência MSE e, em rosa com marcador em losango, os casos com convergência SSIM.

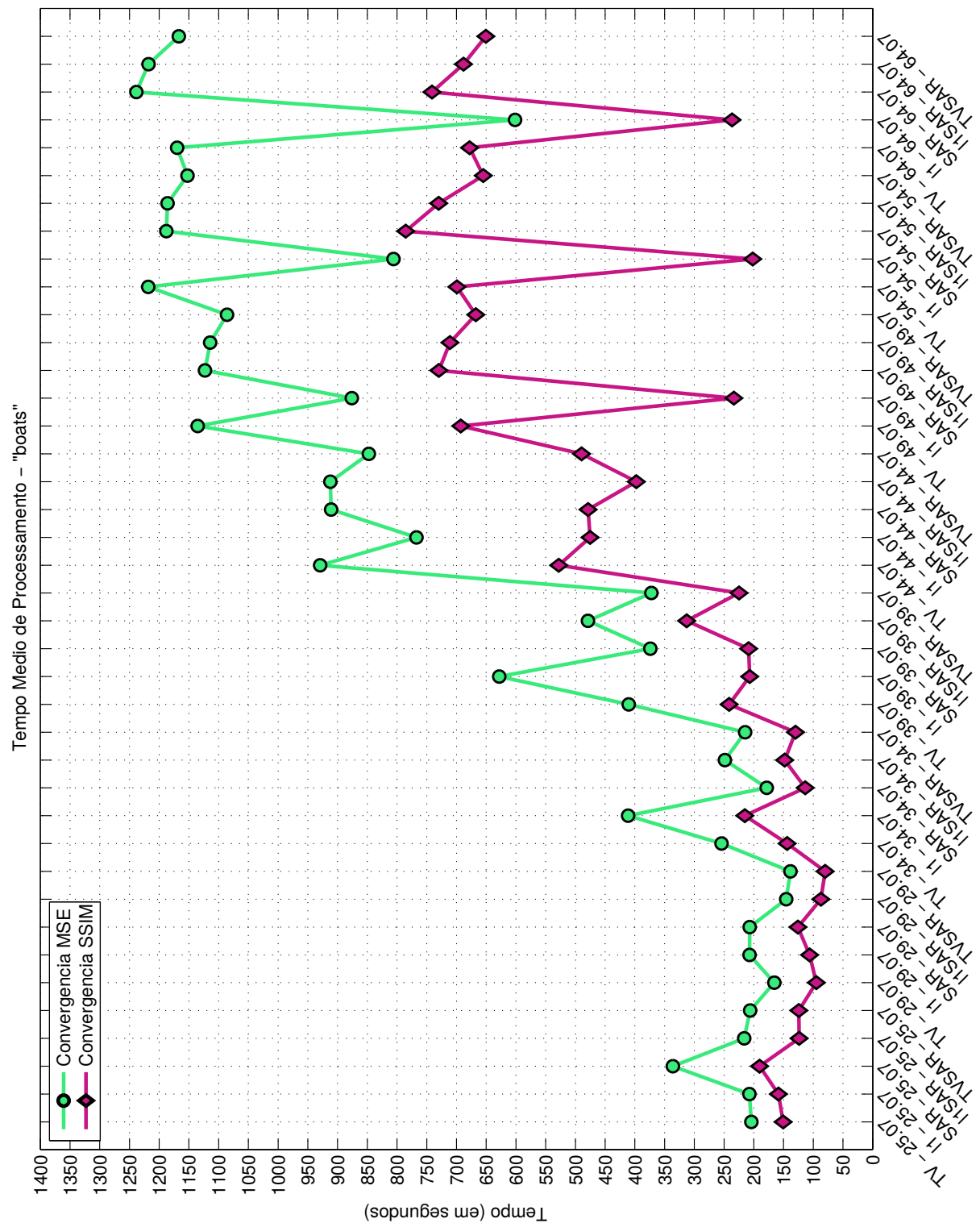


Figura 22 – Gráfico dos tempos médios de processamento dos métodos de Superresolução, aplicados à imagem *boats*. Em verde com marcador em círculo, os casos com convergência MSE e, em rosa com marcador em losango, os casos com convergência SSIM.

5 Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho explorou a Superresolução Multiframe, utilizada para aumentar a resolução espacial de imagens, manipulando várias capturas de uma mesma cena. A abordagem Bayesiana foi utilizada para tratar a natureza mal-posta do problema, que é inverso e contém ruído aleatório. Afim de superar tal complexidade, definida também pela presença da evidência ($p(\mathbf{y})$) na equação da Regra de Bayes, o método utilizado emprega a minimização da divergência de Kullback-Leibler entre a distribuição combinada da *priori* com as distribuições de probabilidade dos hiperparâmetros e a *posteriori*, que resulta na variável latente $\hat{\mathbf{x}}$, objetivo do problema. Essa minimização, por sua vez, é solucionada por métodos iterativos. São eles, o *Expectation Maximization* (utilizado no caso da *priori* SAR) e o *Majorization Minimization* (utilizado nos casos das *priori* TV e ℓ_1).

Nesse trabalho propôs-se aplicar o SSIM como critério de convergência de tais algoritmos iterativos como alternativa ao MSE, critério de convergência largamente utilizado na literatura. Outra questão pertinente em problemas de SR, como discutido no decorrer do trabalho, é a métrica de qualidade utilizada para comparar a imagem HR estimada com a imagem HR original. Observou-se, entre os trabalhos publicados em geral neste contexto, o emprego do PSNR que, por sua vez, utiliza o MSE e, portanto, relaciona-se com tal convergência. Acredita-se, entretanto, que o PSNR identifica erros mais pontuais do que a percepção do ser humano. Nesse sentido, propôs-se avaliar a imagem estimada pelo SSIM, método que analisa similaridades de estruturas entre imagens e se aproxima, dessa forma, da compreensão do sistema visual humano.

Os resultados obtidos, pela aplicação do SSIM na convergência, apresentaram menor tempo de processamento em 97,9% dos casos, inclusive quando o método SR utilizado é baseado em norma quadrática. Uma vez que a convergência proposta é baseada em similaridade de estruturas, a expectativa inicial era de que essa mudança privilegiasse os modelos de *priori* de norma não-quadrática, conhecidos por favorecer a manutenção de bordas. O fato do aprimoramento no tempo ter ocorrido também para os métodos que utilizam norma quadrática sugere a possibilidade de aplicar o SSIM a outros métodos, não explorados neste trabalho, que também utilizam algoritmos iterativos cuja condição de convergência seja baseada na diferença das imagens estimadas em iterações consecutivas. Esse é um aprimoramento importante porque, ainda que as imagens testadas sejam relativamente pequenas e possuem apenas um canal de cor, o tempo de processamento pode chegar a questão de minutos. Ou seja, para uma aplicação com imagens maiores e coloridas (além de mais imagens LR de entrada), a diminuição do tempo pode viabilizar o processo de Superresolução. Além disso, ganho de velocidade pode viabilizar a aplicação dos métodos SR em sistemas embarcados, que demandam menor custo computacional.

O cálculo do erro médio quadrático (MSE) está presente em três ocasiões: na métrica de qualidade, como parâmetro da PSNR, entre a imagem HR estimada e a HR original; no critério de convergência, entre as imagens HR estimadas em iterações consecutivas; e no termo de fidelidade, entre $\mathbf{B}_k \hat{\mathbf{x}}$ e \mathbf{y} . Neste trabalho, os dois primeiros cálculos foram alterados e o SSIM foi incorporado neles, causando as melhorias supracitadas. Nesse sentido, um possível trabalho futuro é basear o cálculo da fidelidade também no SSIM, em detrimento do MSE.

Propõe-se, também como trabalhos futuros, novos testes com os algoritmos SR com mais imagens LR de entrada, com imagens coloridas e em situações reais - onde as imagens LR não são simuladas. Além disso, a incorporação do SSIM como mudança de convergência em outros métodos iterativos, que não os explorados aqui, também é proposta.

Destaca-se, ainda, o bom desempenho do método proposto, no que tange às métricas de qualidade. Neste contexto, conclui-se que o SSIM representa com mais fidelidade a percepção humana, e seu uso como critério de convergência proporcionou a recuperação de bordas, sem introduzir artefatos em demasia. As imagens LR deformadas, HR estimadas e original tem semelhanças inerentes, já que possuem uma só original. Quanto a trabalhos futuros, sugere-se, o estudo do funcionamento do SSIM para analisar se é possível adaptá-lo de forma a empregar tais semelhanças. Naturalmente, análise dessas semelhanças também é sugerida como trabalho futuro.

Entende-se, finalmente, que a maior contribuição deste trabalho diz respeito à aplicação do SSIM como paradigma de avaliação da qualidade de imagens estimadas, que é uma questão de relevante e pode viabilizar a aplicação de métodos de reconstrução e superresolução a diversas situações reais. Os resultados obtidos mostram que a relação entre o critério de avaliação e a convergência pode melhorar as abordagens propostas.

Referências

BABACAN, S. D.; MOLINA, R.; KATSAGGELOS, A. K. Variational bayesian super resolution. *Image Processing, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 20, n. 4, p. 984–999, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 34.

BIOUCAS-DIAS, J. M.; FIGUEIREDO, M. A.; OLIVEIRA, J. P. Adaptive total-variation image deconvolution: A majorization-minimization approach. In: *Proc. EUSIPCO*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–4. Citado na página 49.

BISHOP, C. M. *Pattern recognition and machine learning*. [S.l.]: springer, 2006. Citado na página 47.

CAMPONEZ, M. O. *Reconstrução De Imagens Por Superresolução Utilizando Inferência Bayesiana Aproximada*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 57.

CAMPONEZ, M. O.; SALLES, E. O. T.; SARCINELLI-FILHO, M. Super-resolution image reconstruction using nonparametric bayesian inla approximation. *Image Processing, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 21, n. 8, p. 3491–3501, 2012. Citado na página 37.

CHEN, C.-T. *Linear system theory and design*. [S.l.]: Oxford University Press, Inc., 1995. Citado na página 32.

DEMPSTER, A. P.; LAIRD, N. M.; RUBIN, D. B. Maximum likelihood from incomplete data via the em algorithm. *Journal of the royal statistical society. Series B (methodological)*, JSTOR, p. 1–38, 1977. Citado na página 48.

DUDA, R.; HART, P.; STORK, D. *Pattern Classification*. [S.l.]: Wiley, 2001. Citado na página 43.

ELAD, M.; FEUER, A. Restoration of a single superresolution image from several blurred, noisy, and undersampled measured images. *Image Processing, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 6, n. 12, p. 1646–1658, 1997. Citado na página 37.

FARSIU, S.; ROBINSON, M. D.; ELAD, M.; MILANFAR, P. Fast and robust multiframe super resolution. *Image processing, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 13, n. 10, p. 1327–1344, 2004. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1331445&tag=1>>. Citado na página 46.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Processamento Digital de Imagens*. 3. ed. [S.l.]: Pearson, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 45.

HE, Y.; YAP, K.-H.; CHEN, L.; CHAU, L.-P. A nonlinear least square technique for simultaneous image registration and super-resolution. *Image Processing, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 16, n. 11, p. 2830–2841, 2007. Citado na página 38.

JAYARAMAN, S.; ESAKKIRAJAN, S.; VEERAKIMA, T. *Digital Image Processing*. 3. ed. [S.l.]: Tata McGraw Hill Education private limited, New Delhi, 2009. Citado na página 40.

- KATSAGGELOS, A. K. Iterative image restoration algorithms. *Optical engineering*, International Society for Optics and Photonics, v. 28, n. 7, p. 287735–287735, 1989. Citado na página 43.
- KATSAGGELOS, A. K.; MOLINA, R.; MATEOS, J. *Super Resolution of Images and Video*. [S.l.]: Morgan & Claypool, 2007. Citado 5 vezes nas páginas 11, 28, 29, 31 e 45.
- KULLBACK, S.; LEIBLER, R. A. On information and sufficiency. *The annals of mathematical statistics*, JSTOR, p. 79–86, 1951. Citado na página 47.
- LANGE, K. Elementary optimization. In: *Optimization*. [S.l.]: Springer, 2004. cap. 8, p. 185–219. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 50.
- MISKIN, J. W. Ensemble learning for independent component analysis. In: CITESEER. *in Advances in Independent Component Analysis*. [S.l.], 2000. Citado na página 47.
- MOLINA, R.; KATSAGGELOS, A. K.; MATEOS, J. Bayesian and regularization methods for hyperparameter estimation in image restoration. *IEEE Transactions on Image Processing*, v. 8, n. 2, p. 231–246, February 1999. Disponível em: http://www.researchgate.net/publication/3326919_Bayesian_and_regularization_methods_for_hyperparameter_estimationin_image_restoration. Citado na página 45.
- PAPOULIS, A.; PILLAI, S. U. *Probability, random variables, and stochastic processes*. [S.l.]: Tata McGraw-Hill Education, 2002. Citado na página 41.
- PARK, S. C.; PARK, M. K.; KANG, M. G. Super-resolution image reconstruction: a technical overview. *IEEE Signal Processing Magazine*, v. 20, n. 3, p. 21–36, May 2003. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1203207>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 38.
- PIPA, D. R. *Tópicos em Reconstrução de Imagens e Vídeos*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Novembro 2012. Disponível em: www02.smt.ufrj.br/~eduardo/teses/daniel-pipa-doutorado.pdf. Citado na página 30.
- RIPLEY, B. D. *Spatial statistics*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2005. Citado na página 45.
- SALOMON, D. *Data compression: the complete reference*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2004. Citado na página 33.
- VILLENA, S. *Superresolución y Reconstrucción Bayesiana de Imágenes a Partir de Imágenes de Baja Resolución Rotadas y Desplazadas. Combinación de Modelos*. Tese (Doutorado) — Universidad de Granada, December 2011. Disponível em: <http://digibug.ugr.es/bitstream/10481/20549/1/20702504.pdf>. Citado 10 vezes nas páginas 30, 34, 45, 47, 48, 49, 51, 52, 53 e 57.
- VILLENA, S.; VEGA, M.; BABACAN, S. D.; MOLINA, R.; KATSAGGELOS, A. K. Using the kullback-leibler divergence to combine image priors in super-resolution image reconstruction. In: IEEE. *Image Processing (ICIP), 2010 17th IEEE International Conference on*. [S.l.], 2010. p. 893–896. Citado na página 32.
- VILLENA, S.; VEGA, M.; BABACAN, S. D.; MOLINA, R.; KATSAGGELOS, A. K. Bayesian combination of sparse and non-sparse priors in image super resolution. *Digital Signal Processing*, Elsevier, v. 23, n. 2, p. 530–541, 2013. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1051200412002400>>. Citado 9 vezes nas páginas 11, 32, 34, 37, 39, 46, 47, 51 e 57.

VILLENA, S.; VEGA, M.; MOLINA, R.; KATSAGGELOS, A. K. Bayesian super-resolution image reconstruction using an l1 prior. In: IEEE. *Image and Signal Processing and Analysis, 2009. ISPA 2009. Proceedings of 6th International Symposium on*. [S.l.], 2009. p. 152–157. Citado 4 vezes nas páginas 32, 34, 43 e 51.

WANG, Z.; BOVIK, A. Mean squared error: love it or leave it? *A new look at signal fidelity measures, IEEE Signal Processing Magazine*, v. 26, n. 1, p. 98–117, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 35.

WANG, Z.; BOVIK, A. C.; SHEIKH, H. R.; SIMONCELLI, E. P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *Image Processing, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 13, n. 4, p. 600–612, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 34.

WANG, Z.; QI, F. On ambiguities in super-resolution modeling. *Signal Processing Letters, IEEE*, IEEE, v. 11, n. 8, p. 678–681, 2004. Disponível em: <[10.1109/LSP.2004.831674](http://dx.doi.org/10.1109/LSP.2004.831674)>. Citado na página 37.

ZENG, X.; YANG, L. A robust multiframe super-resolution algorithm based on half-quadratic estimation with modified btv regularization. *Digital Signal Processing*, Elsevier, v. 23, n. 1, p. 98–109, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1051200412001613>>. Citado na página 39.

ZIBETTI, M. V. W.; MAYER, J. Simultaneous super-resolution for video sequences. In: IEEE. *Image Processing, 2005. ICIP 2005. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2005. v. 1, p. I–877. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 30.

ANEXO A – Planilhas Geradas pelos Experimentos do Capítulo 4

As páginas seguintes contem as planilhas geradas pelas baterias de testes explorados no Capítulo 4 deste trabalho. Sete imagens HR originais (Figura 10) foram deformadas por operadores de borramento, deslocamento, subamostragem e ruído, de forma que o SNR varie entre 25,07, 29,07, 34,07, 39,07, 44,07, 49,07, 54,07 e 64,07 dB. As imagens deformadas foram reconstruídas por algoritmos de superresolução que tem distribuições *a priori* distintas, entre ℓ_1 , TV, SAR, ℓ_1 -SAR e TV-SAR. Além disso, tais algoritmos tem convergência baseada em MSE ou SSIM. Cada imagem original possui seis tabelas referentes, de acordo com a convergência utilizada e a imagem HR estimada escolhida como saída - referente à última iteração, ao melhor PSNR ou melhor SSIM - e duas tabelas, referentes à convergência utilizada e ao tempo de processamento de cada teste.

- Tabelas A.1 a A.4: referentes à imagem *cartao*, com convergência MSE
- Tabelas A.5 a A.8: referentes à imagem *cartao*, com convergência SSIM
- Tabelas A.9 a A.12: referentes à imagem *cr5210*, com convergência MSE
- Tabelas A.13 a A.16: referentes à imagem *cr5210*, com convergência SSIM
- Tabelas A.17 a A.20: referentes à imagem *cra5302*, com convergência MSE
- Tabelas A.21 a A.24: referentes à imagem *cra5302*, com convergência SSIM
- Tabelas A.25 a A.28: referentes à imagem *crahouse*, com convergência MSE
- Tabelas A.29 a A.32: referentes à imagem *crahouse*, com convergência SSIM
- Tabelas A.33 a A.36: referentes à imagem *EIAcen120*, com convergência MSE
- Tabelas A.37 a A.40: referentes à imagem *EIAcen120*, com convergência SSIM
- Tabelas A.41 a A.44: referentes à imagem *lena*, com convergência MSE
- Tabelas A.45 a A.48: referentes à imagem *lena*, com convergência SSIM
- Tabelas A.49 a A.52: referentes à imagem *boats*, com convergência MSE
- Tabelas A.53 a A.56: referentes à imagem *boats*, com convergência SSIM

Tabela A.1 – Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original *cartao*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	22	0,00E+0	15,58	3,03E-2	2,77E-2	1,93E-4	0,56053	1,47E-3
II	0	25,07	23	0,00E+0	15,44	2,69E-2	2,85E-2	1,76E-4	0,55747	1,48E-3
SAR	0	25,07	48,6	5,48E-1	17,86	2,93E-2	1,64E-2	1,11E-4	0,65723	1,38E-3
II SAR	0,85	25,07	24	0,00E+0	16,15	3,14E-2	2,43E-2	1,76E-4	0,57815	1,30E-3
TV SAR	0,85	25,07	22,8	4,47E-1	16,19	3,25E-2	2,41E-2	1,80E-4	0,57901	1,25E-3
TV	0	29,07	17	0,00E+0	20,35	1,06E-1	9,23E-3	2,26E-4	0,72007	4,15E-3
II	0	29,07	18	0,00E+0	20,57	7,38E-2	8,76E-3	1,50E-4	0,72218	3,55E-3
SAR	0	29,07	25	0,00E+0	19,56	2,53E-2	1,11E-2	6,46E-5	0,75901	4,02E-3
II SAR	0,85	29,07	17	0,00E+0	20,78	8,64E-2	8,36E-3	1,67E-4	0,73251	3,93E-3
TV SAR	0,85	29,07	16	0,00E+0	20,53	8,96E-2	8,86E-3	1,83E-4	0,72937	4,11E-3
TV	0	34,07	21,4	5,48E-1	25,48	6,98E-2	2,83E-3	4,52E-5	0,87488	3,12E-3
II	0	34,07	23,4	8,94E-1	25,45	2,25E-1	2,85E-3	1,48E-4	0,87877	2,64E-3
SAR	0	34,07	15,2	4,47E-1	21,43	2,03E-2	7,20E-3	3,36E-5	0,84775	2,48E-3
II SAR	0,85	34,07	17	0,00E+0	24,89	1,25E-1	3,24E-3	9,32E-5	0,87475	2,64E-3
TV SAR	0,85	34,07	19	0,00E+0	24,96	5,92E-2	3,19E-3	4,33E-5	0,87160	3,00E-3
TV	0	39,07	32,4	8,94E-1	30,78	6,12E-2	8,35E-4	1,18E-5	0,95535	1,22E-3
II	0	39,07	66,8	4,82E+0	32,55	1,01E-1	5,57E-4	1,29E-5	0,96090	1,18E-3
SAR	0	39,07	37	0,00E+0	23,85	1,35E-2	4,12E-3	1,29E-5	0,89133	1,15E-3
II SAR	0,85	39,07	65	4,12E+0	31,05	6,09E-2	7,86E-4	1,10E-5	0,95487	1,18E-3
TV SAR	0,85	39,07	32	0,00E+0	29,96	1,01E-1	1,01E-3	2,38E-5	0,94995	1,33E-3
TV	0	44,07	63,6	4,98E+0	36,62	1,01E-1	2,18E-4	5,12E-6	0,98172	7,21E-4
II	0	44,07	75,6	2,34E+1	35,28	7,10E+0	1,22E-3	2,41E-3	0,97596	2,08E-2
SAR	0	44,07	122,2	3,27E+0	30,25	6,22E-2	9,43E-4	1,36E-5	0,93100	9,45E-4
II SAR	0,85	44,07	68,2	2,21E+1	34,47	6,06E+0	1,02E-3	1,85E-3	0,97464	1,69E-2
TV SAR	0,85	44,07	67,6	1,82E+0	35,80	7,00E-2	2,63E-4	4,24E-6	0,97835	8,91E-4
TV	0	49,07	79	1,58E+0	40,00	6,63E-2	1,00E-4	1,53E-6	0,98714	5,04E-4
II	0	49,07	38,4	3,13E+0	23,67	8,26E-1	4,37E-3	9,10E-4	0,95216	9,02E-3
SAR	0	49,07	105,6	5,48E-1	35,20	5,84E-2	3,02E-4	4,06E-6	0,95876	8,94E-4
II SAR	0,85	49,07	88,6	3,30E+1	37,58	7,89E+0	9,63E-4	1,98E-3	0,97989	2,00E-2
TV SAR	0,85	49,07	81,6	1,67E+0	39,30	5,34E-2	1,18E-4	1,44E-6	0,98433	5,43E-4
TV	0	54,07	88,6	5,48E-1	43,01	2,40E-1	5,00E-5	2,79E-6	0,99377	1,59E-4
II	0	54,07	34,6	1,34E+0	20,21	1,69E+0	1,00E-2	3,22E-3	0,90023	2,86E-2
SAR	0	54,07	120	1,58E+0	39,62	1,25E-1	1,09E-4	3,13E-6	0,98311	5,84E-4
II SAR	0,85	54,07	25,2	2,95E+0	21,60	1,56E+0	7,26E-3	2,25E-3	0,91720	2,22E-2
TV SAR	0,85	54,07	91,4	1,34E+0	42,55	2,20E-1	5,56E-5	2,85E-6	0,99283	1,60E-4
TV	0	64,07	123,2	1,10E+0	45,38	1,28E-1	2,90E-5	8,64E-7	0,99851	4,01E-5
II	0	64,07	43,8	4,47E-1	18,03	3,53E-2	1,57E-2	1,28E-4	0,85102	1,01E-3
SAR	0	64,07	131,4	4,72E+0	43,18	8,14E-2	4,81E-5	9,09E-7	0,99629	8,02E-5
II SAR	0,85	64,07	21	0,00E+0	18,65	5,60E-2	1,37E-2	1,76E-4	0,85955	1,42E-3
TV SAR	0,85	64,07	95,4	1,14E+0	45,42	2,10E-1	2,87E-5	1,40E-6	0,99862	4,83E-5

Tabela A.2 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original *cartao*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	2	0,00E+0	18,87	0,03	1,30E-2	8,96E-5	0,71207	8,47E-4
II	0	25,07	2	0,00E+0	19,43	0,05	1,14E-2	1,35E-4	0,74027	7,90E-4
SAR	0	25,07	48,6	5,48E-1	17,86	0,03	1,64E-2	1,11E-4	0,65723	1,38E-3
II SAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	18,98	0,04	1,27E-2	1,24E-4	0,72212	5,34E-4
TV SAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	18,64	0,03	1,37E-2	9,24E-5	0,69834	8,64E-4
TV	0	29,07	2,2	4,47E-1	21,17	0,05	7,65E-3	8,37E-5	0,81974	2,44E-2
II	0	29,07	3	0,00E+0	21,83	0,05	6,56E-3	6,92E-5	0,78911	3,89E-3
SAR	0	29,07	4	0,00E+0	19,87	0,05	1,03E-2	1,25E-4	0,72677	3,97E-3
II SAR	0,85	29,07	3,6	5,48E-1	21,15	0,06	7,67E-3	1,07E-4	0,76972	9,37E-3
TV SAR	0,85	29,07	3	0,00E+0	20,86	0,07	8,20E-3	1,34E-4	0,76627	4,46E-3
TV	0	34,07	21,4	5,48E-1	25,48	0,07	2,83E-3	4,52E-5	0,87488	3,12E-3
II	0	34,07	20,8	5,54E+0	25,45	0,22	2,85E-3	1,48E-4	0,87882	2,70E-3
SAR	0	34,07	1	0,00E+0	22,41	0,04	5,74E-3	4,70E-5	0,75430	1,59E-3
II SAR	0,85	34,07	17	0,00E+0	24,89	0,12	3,24E-3	9,32E-5	0,87475	2,64E-3
TV SAR	0,85	34,07	19	0,00E+0	24,96	0,06	3,19E-3	4,33E-5	0,87160	3,00E-3
TV	0	39,07	19,4	7,67E+0	30,82	0,06	8,29E-4	1,09E-5	0,95725	1,50E-3
II	0	39,07	65,8	5,07E+0	32,55	0,10	5,57E-4	1,29E-5	0,96091	1,18E-3
SAR	0	39,07	1	0,00E+0	25,82	0,01	2,62E-3	5,53E-6	0,88234	1,49E-3
II SAR	0,85	39,07	65	4,12E+0	31,05	0,06	7,86E-4	1,10E-5	0,95487	1,18E-3
TV SAR	0,85	39,07	32	0,00E+0	29,96	0,10	1,01E-3	2,38E-5	0,94995	1,33E-3
TV	0	44,07	51,6	7,99E+0	36,64	0,07	2,17E-4	3,44E-6	0,98208	6,35E-4
II	0	44,07	69,8	2,08E+1	35,28	7,11	1,22E-3	2,41E-3	0,97602	2,09E-2
SAR	0	44,07	122,2	3,27E+0	30,25	0,06	9,43E-4	1,36E-5	0,93100	9,45E-4
II SAR	0,85	44,07	64,2	2,03E+1	34,47	6,06	1,02E-3	1,85E-3	0,97470	1,69E-2
TV SAR	0,85	44,07	61	2,35E+0	35,80	0,07	2,63E-4	4,18E-6	0,97844	8,57E-4
TV	0	45,07	34,8	8,37E-1	40,92	0,12	8,08E-5	2,20E-6	0,99545	4,67E-4
II	0	45,07	17,6	1,17E+1	23,69	0,80	4,34E-3	8,64E-4	0,95148	9,95E-3
SAR	0	45,07	88,8	3,03E+0	35,22	0,05	3,01E-4	3,75E-6	0,95990	7,50E-4
II SAR	0,85	45,07	57,2	1,58E+1	38,05	8,15	9,55E-4	1,98E-3	0,98427	2,24E-2
TV SAR	0,85	45,07	36,8	1,30E+0	40,03	0,10	9,94E-5	2,25E-6	0,99405	5,82E-4
TV	0	49,07	60,6	4,51E+0	43,48	0,22	4,49E-5	2,28E-6	0,99571	5,53E-4
II	0	49,07	10	1,51E+1	20,52	1,49	9,24E-3	2,67E-3	0,90178	2,66E-2
SAR	0	49,07	96,4	3,05E+0	39,69	0,10	1,08E-4	2,60E-6	0,98405	5,24E-4
II SAR	0,85	49,07	25,2	2,95E+0	21,60	1,56	7,26E-3	2,25E-3	0,91720	2,22E-2
TV SAR	0,85	49,07	66	1,58E+0	42,96	0,21	5,07E-5	2,46E-6	0,99440	2,15E-4
TV	0	54,07	101,6	8,94E-1	45,64	0,09	2,73E-5	5,72E-7	0,99872	1,17E-5
II	0	54,07	3	0,00E+0	18,73	0,03	1,34E-2	1,01E-4	0,86532	7,92E-4
SAR	0	54,07	131,4	4,72E+0	43,18	0,08	4,81E-5	9,09E-7	0,99629	8,02E-5
II SAR	0,85	54,07	4	0,00E+0	18,68	0,05	1,36E-2	1,63E-4	0,85832	1,27E-3
TV SAR	0,85	54,07	71,2	3,11E+0	45,82	0,13	2,62E-5	7,86E-7	0,99894	3,43E-5

Tabela A.3 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original *cartao*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	1	0,00E+0	18,32	3,79E-2	1,47E-2	1,29E-4	0,74743	3,08E-3
li	0	25,07	1	0,00E+0	18,36	9,92E-2	1,46E-2	3,37E-4	0,75638	5,24E-3
SAR	0	25,07	48,6	5,48E-1	17,86	2,93E-2	1,64E-2	1,11E-4	0,65723	1,38E-3
liSAR	0,85	25,07	1	0,00E+0	18,48	1,12E-1	1,42E-2	3,72E-4	0,75370	5,81E-3
TVSAR	0,85	25,07	1	0,00E+0	18,42	3,83E-2	1,44E-2	1,27E-4	0,74432	3,12E-3
TV	0	29,07	1	0,00E+0	19,48	1,02E-2	1,13E-2	2,64E-5	0,85116	1,71E-3
li	0	29,07	1,6	5,48E-1	20,47	1,24E+0	9,28E-3	2,74E-3	0,84559	2,23E-3
SAR	0	29,07	25	0,00E+0	19,56	2,53E-2	1,11E-2	6,46E-5	0,75901	4,02E-3
liSAR	0,85	29,07	1	0,00E+0	19,14	1,49E-1	1,22E-2	4,19E-4	0,84461	3,83E-3
TVSAR	0,85	29,07	1	0,00E+0	19,63	1,14E-2	1,09E-2	2,86E-5	0,85436	1,97E-3
TV	0	34,07	2	0,00E+0	22,94	1,80E-2	5,08E-3	2,10E-5	0,92184	3,75E-4
li	0	34,07	2	0,00E+0	22,39	1,02E-1	5,76E-3	1,37E-4	0,91447	6,64E-4
SAR	0	34,07	15,2	4,47E-1	21,43	2,03E-2	7,20E-3	3,36E-5	0,84775	2,48E-3
liSAR	0,85	34,07	2	0,00E+0	21,36	7,90E-2	7,31E-3	1,33E-4	0,89548	6,44E-4
TVSAR	0,85	34,07	2	0,00E+0	22,50	1,67E-2	5,62E-3	2,15E-5	0,91238	5,24E-4
TV	0	39,07	7	0,00E+0	29,76	4,54E-2	1,06E-3	1,10E-5	0,96423	8,73E-4
li	0	39,07	23,6	2,51E+0	30,65	1,50E-1	8,62E-4	2,92E-5	0,96321	1,12E-3
SAR	0	39,07	13,2	1,10E+0	23,43	9,31E-2	4,54E-3	9,69E-5	0,89154	1,05E-3
liSAR	0,85	39,07	21	1,41E+0	29,61	1,27E-1	1,09E-3	3,17E-5	0,95693	1,08E-3
TVSAR	0,85	39,07	8	0,00E+0	28,81	6,05E-2	1,32E-3	1,84E-5	0,95626	1,09E-3
TV	0	44,07	13,6	8,94E-1	34,43	2,53E-1	3,61E-4	2,05E-5	0,98997	1,75E-4
li	0	44,07	37,6	7,96E+0	33,05	5,86E+0	1,32E-3	2,35E-3	0,98012	2,31E-2
SAR	0	44,07	77	1,87E+0	29,75	8,90E-2	1,06E-3	2,18E-5	0,93174	8,18E-4
liSAR	0,85	44,07	30,4	2,30E+0	32,52	4,97E+0	1,13E-3	1,79E-3	0,97952	1,96E-2
TVSAR	0,85	44,07	16	0,00E+0	33,73	3,26E-2	4,24E-4	3,18E-6	0,98717	2,14E-4
TV	0	49,07	24,8	4,47E-1	39,90	1,95E-1	1,02E-4	4,73E-6	0,99723	1,11E-4
li	0	49,07	38,4	3,13E+0	23,67	8,26E-1	4,37E-3	9,10E-4	0,95216	9,02E-3
SAR	0	49,07	61,2	4,47E-1	34,31	6,92E-2	3,71E-4	5,86E-6	0,96812	5,08E-4
liSAR	0,85	49,07	46,4	1,03E+1	36,77	7,44E+0	9,79E-4	1,97E-3	0,98633	2,36E-2
TVSAR	0,85	49,07	26	0,00E+0	38,74	5,71E-2	1,34E-4	1,75E-6	0,99640	1,26E-4
TV	0	54,07	32,2	4,47E-1	42,41	1,45E-1	5,74E-5	1,95E-6	0,99899	3,08E-5
li	0	54,07	16	1,78E+1	20,47	1,48E+0	9,34E-3	2,63E-3	0,90234	2,68E-2
SAR	0	54,07	69,2	4,47E-1	38,22	1,65E-1	1,51E-4	5,73E-6	0,98716	2,01E-4
liSAR	0,85	54,07	25,2	2,95E+0	21,60	1,56E+0	7,26E-3	2,25E-3	0,91720	2,22E-2
TVSAR	0,85	54,07	33,8	4,47E-1	41,56	1,22E-1	6,99E-5	1,99E-6	0,99867	1,73E-5
TV	0	64,07	73,4	1,70E+1	43,05	2,01E+0	5,37E-5	2,18E-5	0,99878	2,06E-5
li	0	64,07	3	0,00E+0	18,73	3,28E-2	1,34E-2	1,01E-4	0,86532	7,92E-4
SAR	0	64,07	109	1,87E+0	43,16	8,05E-2	4,83E-5	9,03E-7	0,99630	8,15E-5
liSAR	0,85	64,07	21	0,00E+0	18,65	5,60E-2	1,37E-2	1,76E-4	0,85955	1,42E-3
TVSAR	0,85	64,07	42,6	8,94E-1	43,42	1,31E-1	4,55E-5	1,38E-6	0,99927	1,35E-5

Tabela A.4 – Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência MSE, a partir da imagem HR original *cartao*

Método SR	λ	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	55,878	1,52E+0	34,07	54,334	1,74E+0	44,07	194	2,55E+1	54,07	252,452	1,21E+1
li	0	25,07	57,442	2,22E+0	34,07	61,714	3,91E+0	44,07	232,722	7,96E+1	54,07	86,768	2,80E+0
SAR	0	25,07	114,87	4,00E+0	34,07	40,022	3,32E+0	44,07	337,728	1,77E+1	54,07	324,034	1,27E+1
liSAR	0,85	25,07	59,614	3,15E+0	34,07	46	2,81E+0	44,07	208,554	7,43E+1	54,07	64,058	6,16E+0
TVSAR	0,85	25,07	57,04	2,33E+0	34,07	48,658	2,51E+0	44,07	196,95	4,65E+0	54,07	255,706	1,29E+1
TV	0	29,07	43,186	1,41E+0	39,07	81,526	2,21E+0	49,07	232,002	9,12E+0	64,07	380,656	2,11E+1
li	0	29,07	46,082	1,56E+0	39,07	210,698	2,03E+1	49,07	95,256	1,17E+1	64,07	112,006	6,31E+0
SAR	0	29,07	59,902	2,57E+0	39,07	90,418	4,25E+0	49,07	293,054	1,26E+1	64,07	358,434	2,77E+1
liSAR	0,85	29,07	42,498	1,38E+0	39,07	200,924	1,57E+1	49,07	259,154	1,02E+2	64,07	56,18	3,55E+0
TVSAR	0,85	29,07	40,13	1,49E+0	39,07	79,054	3,74E+0	49,07	234,378	1,05E+1	64,07	272,472	1,58E+1

Tabela A.5 – Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original *cartao*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	15	0,00E+0	15,54	3,80E-2	2,80E-2	2,44E-4	0,55809	1,83E-3
II	0	25,07	16	0,00E+0	15,40	3,71E-2	2,89E-2	2,46E-4	0,55483	1,73E-3
SAR	0	25,07	31,6	5,48E-1	17,85	2,64E-2	1,64E-2	9,98E-5	0,65735	1,16E-3
II SAR	0,85	25,07	17	0,00E+0	16,10	4,61E-2	2,46E-2	2,61E-4	0,57557	1,92E-3
TVSAR	0,85	25,07	16	0,00E+0	16,14	4,53E-2	2,43E-2	2,53E-4	0,57657	1,97E-3
TV	0	29,07	11,4	5,48E-1	20,33	9,50E-2	9,27E-3	2,01E-4	0,72056	3,15E-3
II	0	29,07	13	0,00E+0	20,57	7,22E-2	8,76E-3	1,45E-4	0,72278	3,02E-3
SAR	0	29,07	19	0,00E+0	19,57	1,99E-2	1,10E-2	5,07E-5	0,76069	1,57E-3
II SAR	0,85	29,07	12	0,00E+0	20,77	7,69E-2	8,37E-3	1,47E-4	0,73345	2,73E-3
TVSAR	0,85	29,07	11	0,00E+0	20,52	6,99E-2	8,88E-3	1,42E-4	0,73025	2,54E-3
TV	0	34,07	14	0,00E+0	25,53	9,76E-2	2,80E-3	6,30E-5	0,87241	2,31E-3
II	0	34,07	14	0,00E+0	25,65	1,49E-1	2,72E-3	9,40E-5	0,87626	2,25E-3
SAR	0	34,07	11,4	5,48E-1	21,41	2,86E-2	7,23E-3	4,76E-5	0,84578	2,30E-3
II SAR	0,85	34,07	12	0,00E+0	25,02	1,43E-1	3,15E-3	1,03E-4	0,87251	2,15E-3
TVSAR	0,85	34,07	13	0,00E+0	24,92	8,82E-2	3,22E-3	6,53E-5	0,86885	2,39E-3
TV	0	39,07	23,4	5,48E-1	30,74	1,16E-1	8,44E-4	2,23E-5	0,95488	1,66E-3
II	0	39,07	56,4	6,27E+0	32,52	6,48E-2	5,59E-4	8,41E-6	0,96038	1,62E-3
SAR	0	39,07	24,8	4,47E-1	23,81	2,23E-2	4,16E-3	2,14E-5	0,89089	2,31E-4
II SAR	0,85	39,07	49,6	4,62E+0	30,97	6,01E-2	8,00E-4	1,10E-5	0,95423	1,66E-3
TVSAR	0,85	39,07	23	0,00E+0	29,92	6,61E-2	1,02E-3	1,54E-5	0,94943	1,58E-3
TV	0	44,07	53,2	1,10E+0	36,46	7,02E-2	2,26E-4	3,63E-6	0,98125	3,07E-4
II	0	44,07	52,4	2,60E+1	32,59	7,76E+0	1,65E-3	2,05E-3	0,97313	1,64E-2
SAR	0	44,07	100	7,07E-1	30,20	2,37E-2	9,56E-4	5,21E-6	0,93017	1,18E-3
II SAR	0,85	44,07	69,8	3,90E+0	37,08	9,78E-2	1,96E-4	4,36E-6	0,98189	2,77E-4
TVSAR	0,85	44,07	54	1,87E+0	35,66	9,75E-2	2,72E-4	6,01E-6	0,97781	5,02E-4
TV	0	49,07	69,4	8,94E-1	40,14	2,01E-1	9,69E-5	4,59E-6	0,98792	3,96E-4
II	0	49,07	24	0,00E+0	22,73	2,81E-1	5,34E-3	3,40E-4	0,94198	3,45E-3
SAR	0	49,07	96,6	1,52E+0	35,14	5,92E-2	3,06E-4	4,16E-6	0,95807	1,16E-3
II SAR	0,85	49,07	21	0,00E+0	23,78	2,44E-1	4,19E-3	2,33E-4	0,94754	2,59E-3
TVSAR	0,85	49,07	72,2	1,64E+0	39,39	1,55E-1	1,15E-4	4,15E-6	0,98514	5,21E-4
TV	0	54,07	76	0,00E+0	43,09	5,94E-2	4,91E-5	6,74E-7	0,99394	1,99E-4
II	0	54,07	20	0,00E+0	19,56	4,22E-1	1,11E-2	1,10E-3	0,89028	9,26E-3
SAR	0	54,07	104	2,55E+0	39,68	7,95E-2	1,08E-4	1,98E-6	0,98344	9,77E-4
II SAR	0,85	54,07	16,6	5,48E-1	20,98	4,56E-1	8,01E-3	8,47E-4	0,90938	7,80E-3
TVSAR	0,85	54,07	78,6	1,95E+0	42,64	7,57E-2	5,44E-5	9,50E-7	0,99303	3,13E-4
TV	0	64,07	107,4	1,52E+0	45,56	6,91E-2	2,78E-5	4,43E-7	0,99865	5,22E-6
II	0	64,07	19	0,00E+0	18,02	3,36E-2	1,58E-2	1,21E-4	0,85054	9,68E-4
SAR	0	64,07	104	2,00E+0	43,10	6,78E-2	4,90E-5	7,72E-7	0,99632	4,43E-5
II SAR	0,85	64,07	14	0,00E+0	18,62	5,11E-2	1,37E-2	1,61E-4	0,85881	1,31E-3
TVSAR	0,85	64,07	77,6	1,14E+0	45,64	1,02E-1	2,73E-5	6,38E-7	0,99876	2,56E-5

Tabela A.6 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original *cartao*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	2	0,00E+0	18,85	2,86E-2	1,30E-2	8,62E-5	0,71463	1,12E-3
li	0	25,07	2	0,00E+0	19,43	8,41E-2	1,14E-2	2,22E-4	0,74351	1,66E-3
SAR	0	25,07	31,6	5,48E-1	17,85	2,64E-2	1,64E-2	9,98E-5	0,65735	1,16E-3
liSAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	18,97	6,48E-2	1,27E-2	1,90E-4	0,72516	1,61E-3
TVSAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	18,63	2,69E-2	1,37E-2	8,54E-5	0,70052	1,26E-3
<hr/>										
TV	0	29,07	2,2	4,47E-1	21,18	3,90E-2	7,62E-3	6,85E-5	0,82033	2,39E-2
li	0	29,07	3	0,00E+0	21,87	2,79E-2	6,50E-3	4,17E-5	0,79002	1,76E-3
SAR	0	29,07	3,8	4,47E-1	19,88	3,49E-2	1,03E-2	8,31E-5	0,72653	2,84E-3
liSAR	0,85	29,07	3,2	4,47E-1	21,17	3,69E-2	7,64E-3	6,50E-5	0,78080	9,17E-3
TVSAR	0,85	29,07	3	0,00E+0	20,87	4,60E-2	8,19E-3	8,68E-5	0,76710	2,23E-3
<hr/>										
TV	0	34,07	14	0,00E+0	25,53	9,76E-2	2,80E-3	6,30E-5	0,87241	2,31E-3
li	0	34,07	14	0,00E+0	25,65	1,49E-1	2,72E-3	9,40E-5	0,87626	2,25E-3
SAR	0	34,07	1	0,00E+0	22,36	8,59E-2	5,81E-3	1,15E-4	0,75236	1,77E-3
liSAR	0,85	34,07	12	0,00E+0	25,02	1,43E-1	3,15E-3	1,03E-4	0,87251	2,15E-3
TVSAR	0,85	34,07	13	0,00E+0	24,92	8,82E-2	3,22E-3	6,53E-5	0,86885	2,39E-3
<hr/>										
TV	0	39,07	15,2	4,47E-1	30,77	1,00E-1	8,37E-4	1,91E-5	0,95742	1,34E-3
li	0	39,07	56,4	6,27E+0	32,52	6,48E-2	5,59E-4	8,41E-6	0,96038	1,62E-3
SAR	0	39,07	1	0,00E+0	25,78	3,13E-2	2,64E-3	1,89E-5	0,88232	1,10E-3
liSAR	0,85	39,07	49,6	4,62E+0	30,97	6,01E-2	8,00E-4	1,10E-5	0,95423	1,66E-3
TVSAR	0,85	39,07	23	0,00E+0	29,92	6,61E-2	1,02E-3	1,54E-5	0,94943	1,58E-3
<hr/>										
TV	0	44,07	46,8	7,12E+0	36,47	7,09E-2	2,26E-4	3,67E-6	0,98176	5,33E-4
li	0	44,07	48	3,01E+1	32,60	7,75E+0	1,64E-3	2,04E-3	0,97314	1,66E-2
SAR	0	44,07	100	7,07E-1	30,20	2,37E-2	9,56E-4	5,21E-6	0,93017	1,18E-3
liSAR	0,85	44,07	69,6	4,04E+0	37,08	9,77E-2	1,96E-4	4,36E-6	0,98189	2,74E-4
TVSAR	0,85	44,07	53,2	8,37E-1	35,66	9,72E-2	2,72E-4	5,99E-6	0,97784	4,75E-4
<hr/>										
TV	0	49,07	34,6	8,94E-1	40,93	9,70E-2	8,07E-5	1,79E-6	0,99554	2,75E-4
li	0	49,07	24	0,00E+0	22,73	2,81E-1	5,34E-3	3,40E-4	0,94198	3,45E-3
SAR	0	49,07	84,8	4,27E+0	35,16	5,50E-2	3,05E-4	3,86E-6	0,95965	6,83E-4
liSAR	0,85	49,07	21	0,00E+0	23,78	2,44E-1	4,19E-3	2,33E-4	0,94754	2,59E-3
TVSAR	0,85	49,07	37,6	8,94E-1	40,01	8,05E-2	9,98E-5	1,83E-6	0,99374	3,75E-4
<hr/>										
TV	0	54,07	54,4	2,30E+0	43,51	7,39E-2	4,46E-5	7,64E-7	0,99643	3,63E-4
li	0	54,07	3,6	5,48E-1	19,92	3,47E-1	1,02E-2	8,27E-4	0,89114	6,52E-3
SAR	0	54,07	95	4,69E+0	39,72	7,09E-2	1,07E-4	1,75E-6	0,98423	8,42E-4
liSAR	0,85	54,07	16,6	5,48E-1	20,98	4,56E-1	8,01E-3	8,47E-4	0,90938	7,80E-3
TVSAR	0,85	54,07	62	3,94E+0	42,95	7,49E-2	5,07E-5	8,78E-7	0,99481	5,49E-4
<hr/>										
TV	0	64,07	103,8	1,79E+0	45,62	6,53E-2	2,74E-5	4,12E-7	0,99872	2,39E-5
li	0	64,07	3	0,00E+0	18,71	3,15E-2	1,35E-2	9,74E-5	0,86486	7,60E-4
SAR	0	64,07	104	2,00E+0	43,10	6,78E-2	4,90E-5	7,72E-7	0,99632	4,43E-5
liSAR	0,85	64,07	4	0,00E+0	18,65	4,78E-2	1,36E-2	1,49E-4	0,85771	1,18E-3
TVSAR	0,85	64,07	70,4	2,19E+0	45,87	5,75E-2	2,59E-5	3,43E-7	0,99897	2,85E-5

Tabela A.7 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original *cartao*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	1	0,00E+0	18,30	1,83E-2	1,48E-2	6,24E-5	0,75236	2,78E-3
II	0	25,07	1	0,00E+0	18,36	1,06E-1	1,46E-2	3,59E-4	0,76264	5,13E-3
SAR	0	25,07	31,6	5,48E-1	17,85	2,64E-2	1,64E-2	9,98E-5	0,65735	1,16E-3
II SAR	0,85	25,07	1	0,00E+0	18,48	1,13E-1	1,42E-2	3,71E-4	0,76031	5,63E-3
TV SAR	0,85	25,07	1	0,00E+0	18,40	2,00E-2	1,44E-2	6,64E-5	0,74938	2,76E-3
TV	0	29,07	1	0,00E+0	19,48	4,30E-2	1,13E-2	1,12E-4	0,85088	1,56E-3
II	0	29,07	1,4	5,48E-1	20,03	1,25E+0	1,02E-2	2,74E-3	0,84562	1,21E-3
SAR	0	29,07	19	0,00E+0	19,57	1,99E-2	1,10E-2	5,07E-5	0,76069	1,57E-3
II SAR	0,85	29,07	1	0,00E+0	19,20	1,11E-1	1,20E-2	3,13E-4	0,84695	3,50E-3
TV SAR	0,85	29,07	1	0,00E+0	19,64	4,22E-2	1,09E-2	1,05E-4	0,85402	1,49E-3
TV	0	34,07	2	0,00E+0	22,91	2,83E-2	5,11E-3	3,34E-5	0,92153	8,10E-4
II	0	34,07	2	0,00E+0	22,46	1,11E-1	5,68E-3	1,47E-4	0,91509	1,37E-3
SAR	0	34,07	11,4	5,48E-1	21,41	2,86E-2	7,23E-3	4,76E-5	0,84578	2,30E-3
II SAR	0,85	34,07	2	0,00E+0	21,42	1,05E-1	7,21E-3	1,75E-4	0,89622	1,54E-3
TV SAR	0,85	34,07	2	0,00E+0	22,47	2,65E-2	5,66E-3	3,45E-5	0,91193	8,92E-4
TV	0	39,07	7	0,00E+0	29,75	5,46E-2	1,06E-3	1,33E-5	0,96371	7,05E-4
II	0	39,07	26,2	5,02E+0	30,60	2,70E-1	8,73E-4	5,47E-5	0,96266	1,17E-3
SAR	0	39,07	13,8	1,79E+0	23,46	1,40E-1	4,51E-3	1,46E-4	0,89102	1,90E-4
II SAR	0,85	39,07	22,6	2,88E+0	29,60	1,95E-1	1,10E-3	4,96E-5	0,95620	1,24E-3
TV SAR	0,85	39,07	8	0,00E+0	28,79	4,63E-2	1,32E-3	1,40E-5	0,95565	6,93E-4
TV	0	44,07	13,2	4,47E-1	34,27	1,52E-1	3,74E-4	1,29E-5	0,98992	9,68E-5
II	0	44,07	32,6	8,96E+0	30,98	6,29E+0	1,73E-3	1,98E-3	0,97629	1,93E-2
SAR	0	44,07	75,4	1,95E+0	29,72	7,48E-2	1,07E-3	1,83E-5	0,93087	1,06E-3
II SAR	0,85	44,07	34,2	3,63E+0	34,72	7,07E-2	3,37E-4	5,46E-6	0,98806	2,30E-4
TV SAR	0,85	44,07	15,8	4,47E-1	33,63	1,34E-1	4,34E-4	1,36E-5	0,98704	1,20E-4
TV	0	49,07	24,6	5,48E-1	39,85	1,93E-1	1,04E-4	4,64E-6	0,99720	6,18E-5
II	0	49,07	24	0,00E+0	22,73	2,81E-1	5,34E-3	3,40E-4	0,94198	3,45E-3
SAR	0	49,07	61,2	4,47E-1	34,30	5,11E-2	3,71E-4	4,36E-6	0,96791	3,45E-4
II SAR	0,85	49,07	21	0,00E+0	23,78	2,44E-1	4,19E-3	2,33E-4	0,94754	2,59E-3
TV SAR	0,85	49,07	25,8	8,37E-1	38,64	2,37E-1	1,37E-4	7,50E-6	0,99635	5,41E-5
TV	0	54,07	32	0,00E+0	42,50	7,00E-2	5,62E-5	9,08E-7	0,99900	9,33E-6
II	0	54,07	13,2	9,31E+0	19,73	1,82E-1	1,06E-2	4,48E-4	0,89182	7,14E-3
SAR	0	54,07	69,6	5,48E-1	38,32	1,07E-1	1,47E-4	3,56E-6	0,98726	2,12E-4
II SAR	0,85	54,07	16,6	5,48E-1	20,98	4,56E-1	8,01E-3	8,47E-4	0,90938	7,80E-3
TV SAR	0,85	54,07	34	0,00E+0	41,61	8,69E-2	6,90E-5	1,40E-6	0,99865	1,24E-5
TV	0	64,07	62,8	8,37E-1	41,67	2,45E-2	6,81E-5	3,84E-7	0,99881	6,22E-6
II	0	64,07	3	0,00E+0	18,71	3,15E-2	1,35E-2	9,74E-5	0,86486	7,60E-4
SAR	0	64,07	104	2,00E+0	43,10	6,78E-2	4,90E-5	7,72E-7	0,99632	4,43E-5
II SAR	0,85	64,07	14	0,00E+0	18,62	5,11E-2	1,37E-2	1,61E-4	0,85881	1,31E-3
TV SAR	0,85	64,07	42,4	1,34E+0	43,49	1,63E-1	4,48E-5	1,70E-6	0,99928	1,34E-5

Tabela A.8 – Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência SSIM, a partir da imagem HR original *cartao*

Método SR	λ	SNR (dB)	Média		Desvio Padrão	SNR (dB)	Média		Desvio Padrão	SNR (dB)	Média		Desvio Padrão
			Média	Desvio Padrão			Média	Desvio Padrão			Média	Desvio Padrão	
TV	0	25,07	39,492	1,70E+0	29,07	30,282	1,88E+0	34,07	36,206	1,26E+0	39,07	58,414	2,61E+0
II	0	25,07	41,688	1,64E+0	29,07	34,31	1,35E+0	34,07	37,93	1,42E+0	39,07	176,936	1,87E+1
SAR	0	25,07	75,452	3,21E+0	29,07	46,754	1,76E+0	34,07	29,864	2,06E+0	39,07	60,458	3,18E+0
II SAR	0,85	25,07	42,7	1,66E+0	29,07	30,972	9,43E-1	34,07	32,654	1,17E+0	39,07	153,462	1,41E+1
TV SAR	0,85	25,07	40,556	2,11E+0	29,07	28,69	1,02E+0	34,07	33,49	1,35E+0	39,07	56,606	2,16E+0
TV	0	44,07	160,476	5,86E+0	49,07	216,266	1,76E+1	54,07	230,696	2,01E+1	64,07	350,532	3,26E+1
II	0	44,07	158,744	8,93E+1	49,07	63,534	5,46E+0	54,07	54,61	4,07E+0	64,07	53,062	4,34E+0
SAR	0	44,07	285,614	2,33E+1	49,07	283,194	2,60E+1	54,07	300,604	2,97E+1	64,07	298,744	2,67E+1
II SAR	0,85	44,07	226,704	2,97E+1	49,07	54,94	4,23E+0	54,07	46,094	4,49E+0	64,07	40,618	3,33E+0
TV SAR	0,85	44,07	166,824	1,82E+1	49,07	220,294	1,72E+1	54,07	235,264	2,26E+1	64,07	238,558	2,14E+1

Tabela A.9 – Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original *cr5210*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	20	0,00E+0	24,34	4,52E-2	3,68E-3	3,82E-5	0,65680	3,29E-3
l1	0	25,07	20,6	5,48E-1	24,19	4,77E-2	3,81E-3	4,18E-5	0,64931	3,44E-3
SAR	0	25,07	40,8	4,47E-1	26,44	1,63E-2	2,27E-3	8,49E-6	0,77447	1,39E-3
l1SAR	0,85	25,07	21	0,00E+0	24,83	4,57E-2	3,29E-3	3,45E-5	0,67790	3,32E-3
TVSAR	0,85	25,07	20,6	5,48E-1	24,90	4,23E-2	3,24E-3	3,14E-5	0,68187	3,18E-3
TV	0	29,07	14,6	5,48E-1	28,52	3,92E-2	1,41E-3	1,28E-5	0,83544	2,31E-3
l1	0	29,07	17,2	4,47E-1	28,56	4,36E-2	1,39E-3	1,41E-5	0,83354	2,29E-3
SAR	0	29,07	21,2	4,47E-1	28,11	1,68E-2	1,54E-3	5,96E-6	0,85275	1,26E-3
l1SAR	0,85	29,07	14	0,00E+0	28,76	4,39E-2	1,33E-3	1,35E-5	0,84329	2,09E-3
TVSAR	0,85	29,07	13,2	4,47E-1	28,69	3,99E-2	1,35E-3	1,25E-5	0,84351	2,07E-3
TV	0	34,07	21	0,00E+0	31,81	2,87E-2	6,58E-4	4,34E-6	0,92369	7,19E-4
l1	0	34,07	23,2	4,47E-1	31,98	3,17E-2	6,33E-4	4,59E-6	0,92477	7,37E-4
SAR	0	34,07	13	0,00E+0	29,71	1,95E-2	1,07E-3	4,80E-6	0,90088	4,33E-4
l1SAR	0,85	34,07	17,8	4,47E-1	31,79	1,79E-2	6,63E-4	2,74E-6	0,92364	5,17E-4
TVSAR	0,85	34,07	18	0,00E+0	31,63	2,24E-2	6,87E-4	3,54E-6	0,92235	5,83E-4
TV	0	39,07	39	2,65E+0	34,52	4,40E-2	3,53E-4	3,58E-6	0,96080	3,55E-4
l1	0	39,07	40,2	8,37E-1	34,71	2,13E-2	3,38E-4	1,66E-6	0,96167	3,27E-4
SAR	0	39,07	29	0,00E+0	31,38	1,19E-2	7,28E-4	1,99E-6	0,93010	2,16E-4
l1SAR	0,85	39,07	34,6	8,94E-1	34,58	3,17E-2	3,48E-4	2,55E-6	0,96042	2,26E-4
TVSAR	0,85	39,07	34	7,07E-1	34,38	4,52E-2	3,65E-4	3,80E-6	0,95929	3,03E-4
TV	0	44,07	79,6	2,61E+0	38,53	9,35E-2	1,40E-4	3,03E-6	0,98177	3,51E-4
l1	0	44,07	80	1,73E+0	38,75	8,06E-2	1,33E-4	2,48E-6	0,98250	2,62E-4
SAR	0	44,07	153,4	2,79E+0	35,96	4,22E-2	2,54E-4	2,46E-6	0,97014	3,02E-4
l1SAR	0,85	44,07	74,6	2,41E+0	38,86	7,74E-2	1,30E-4	2,32E-6	0,98280	2,98E-4
TVSAR	0,85	44,07	75,8	2,05E+0	38,67	8,09E-2	1,36E-4	2,53E-6	0,98221	3,39E-4
TV	0	49,07	100,4	5,48E-1	42,62	1,55E-1	5,47E-5	1,97E-6	0,99175	1,92E-4
l1	0	49,07	97	1,22E+0	42,99	1,67E-1	5,03E-5	1,96E-6	0,99237	1,73E-4
SAR	0	49,07	121,8	8,37E-1	42,04	4,27E-2	6,25E-5	6,14E-7	0,99132	1,79E-4
l1SAR	0,85	49,07	92	2,35E+0	43,12	1,35E-1	4,87E-5	1,54E-6	0,99251	1,48E-4
TVSAR	0,85	49,07	94,6	1,14E+0	42,83	1,37E-1	5,21E-5	1,67E-6	0,99201	1,62E-4
TV	0	54,07	114,6	2,41E+0	48,02	7,36E-2	1,58E-5	2,67E-7	0,99761	5,78E-5
l1	0	54,07	109,2	1,48E+0	48,43	1,29E-1	1,44E-5	4,27E-7	0,99784	7,47E-5
SAR	0	54,07	132,8	8,37E-1	47,83	1,08E-1	1,65E-5	4,07E-7	0,99746	9,70E-5
l1SAR	0,85	54,07	106,4	2,51E+0	48,41	1,20E-1	1,44E-5	3,99E-7	0,99781	7,74E-5
TVSAR	0,85	54,07	111	2,12E+0	48,12	1,05E-1	1,54E-5	3,73E-7	0,99763	8,14E-5
TV	0	64,07	115,2	3,83E+0	51,59	9,13E-2	6,93E-6	1,46E-7	0,99921	1,81E-5
l1	0	64,07	112,6	2,07E+0	52,14	7,90E-2	6,10E-6	1,11E-7	0,99933	1,05E-5
SAR	0	64,07	140,8	4,44E+0	52,26	6,66E-2	5,94E-6	9,08E-8	0,99930	1,02E-5
l1SAR	0,85	64,07	109,8	1,79E+0	52,18	6,98E-2	6,06E-6	9,72E-8	0,99932	9,86E-6
TVSAR	0,85	64,07	112,6	2,61E+0	51,74	1,34E-1	6,70E-6	2,10E-7	0,99923	2,46E-5

Tabela A.10 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original *cr5210*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	2	0,00E+0	27,15	3,23E-2	1,93E-3	1,43E-5	0,79796	1,66E-3
II	0	25,07	2	0,00E+0	27,24	4,25E-2	1,89E-3	1,85E-5	0,80043	1,60E-3
SAR	0	25,07	40,8	4,47E-1	26,44	1,63E-2	2,27E-3	8,49E-6	0,77447	1,39E-3
II SAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	27,01	3,46E-2	1,99E-3	1,58E-5	0,79676	1,61E-3
TV SAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	26,99	2,88E-2	2,00E-3	1,32E-5	0,79424	1,65E-3
TV	0	29,07	3	0,00E+0	29,14	2,88E-2	1,22E-3	8,11E-6	0,86220	1,70E-3
II	0	29,07	3	0,00E+0	29,40	3,72E-2	1,15E-3	9,88E-6	0,86531	1,73E-3
SAR	0	29,07	5	0,00E+0	28,28	2,54E-2	1,49E-3	8,70E-6	0,84748	1,64E-3
II SAR	0,85	29,07	3	0,00E+0	29,08	2,95E-2	1,24E-3	8,42E-6	0,86369	1,61E-3
TV SAR	0,85	29,07	3	0,00E+0	28,96	3,05E-2	1,27E-3	8,95E-6	0,86027	1,68E-3
TV	0	34,07	7,2	4,47E-1	31,84	2,50E-2	6,55E-4	3,77E-6	0,92418	6,63E-4
II	0	34,07	6,2	4,47E-1	32,04	2,28E-2	6,25E-4	3,27E-6	0,92570	6,19E-4
SAR	0	34,07	2	0,00E+0	29,98	2,88E-2	1,00E-3	6,66E-6	0,90412	5,41E-4
II SAR	0,85	34,07	17,8	4,47E-1	31,79	1,79E-2	6,63E-4	2,74E-6	0,92364	5,17E-4
TV SAR	0,85	34,07	18	0,00E+0	31,63	2,24E-2	6,87E-4	3,54E-6	0,92235	5,83E-4
TV	0	39,07	32,8	8,32E+0	34,53	4,59E-2	3,53E-4	3,74E-6	0,96081	3,49E-4
II	0	39,07	27,6	5,50E+0	34,71	2,31E-2	3,38E-4	1,80E-6	0,96170	3,06E-4
SAR	0	39,07	1	0,00E+0	32,81	6,89E-2	5,23E-4	8,25E-6	0,92971	9,14E-4
II SAR	0,85	39,07	34,6	8,94E-1	34,58	3,17E-2	3,48E-4	2,55E-6	0,96042	2,26E-4
TV SAR	0,85	39,07	34	7,07E-1	34,38	4,52E-2	3,65E-4	3,80E-6	0,95929	3,03E-4
TV	0	44,07	52,2	8,87E+0	38,55	8,81E-2	1,40E-4	2,84E-6	0,98216	3,38E-4
II	0	44,07	50,8	4,09E+0	38,77	7,74E-2	1,33E-4	2,37E-6	0,98279	3,02E-4
SAR	0	44,07	153,4	2,79E+0	35,96	4,22E-2	2,54E-4	2,46E-6	0,97014	3,02E-4
II SAR	0,85	44,07	68,8	1,64E+0	38,86	7,59E-2	1,30E-4	2,27E-6	0,98282	2,90E-4
TV SAR	0,85	44,07	68	5,20E+0	38,67	8,13E-2	1,36E-4	2,54E-6	0,98225	3,27E-4
TV	0	49,07	87,8	1,79E+0	42,64	1,52E-1	5,45E-5	1,93E-6	0,99181	1,86E-4
II	0	49,07	77,8	1,92E+0	43,02	1,56E-1	4,99E-5	1,82E-6	0,99249	1,56E-4
SAR	0	49,07	121,8	8,37E-1	42,04	4,27E-2	6,25E-5	6,14E-7	0,99132	1,79E-4
II SAR	0,85	49,07	70,4	1,34E+1	43,17	1,04E-1	4,82E-5	1,17E-6	0,99280	2,14E-4
TV SAR	0,85	49,07	73,2	1,16E+1	42,86	1,28E-1	5,18E-5	1,54E-6	0,99228	2,74E-4
TV	0	54,07	102	3,16E+0	48,04	6,52E-2	1,57E-5	2,36E-7	0,99764	5,73E-5
II	0	54,07	93,2	5,26E+0	48,46	1,09E-1	1,43E-5	3,60E-7	0,99788	5,95E-5
SAR	0	54,07	131,6	2,07E+0	47,83	1,08E-1	1,65E-5	4,07E-7	0,99746	9,51E-5
II SAR	0,85	54,07	89	3,74E+0	48,46	1,01E-1	1,43E-5	3,33E-7	0,99786	6,51E-5
TV SAR	0,85	54,07	97	2,83E+0	48,14	9,29E-2	1,53E-5	3,29E-7	0,99767	7,12E-5
TV	0	64,07	115,2	3,83E+0	51,59	9,13E-2	6,93E-6	1,46E-7	0,99921	1,81E-5
II	0	64,07	109	2,55E+0	52,15	7,77E-2	6,10E-6	1,10E-7	0,99933	9,85E-6
SAR	0	64,07	140,8	4,44E+0	52,26	6,66E-2	5,94E-6	9,08E-8	0,99930	1,02E-5
II SAR	0,85	64,07	104,4	3,21E+0	52,18	6,95E-2	6,05E-6	9,66E-8	0,99933	9,85E-6
TV SAR	0,85	64,07	112,6	2,61E+0	51,74	1,34E-1	6,70E-6	2,10E-7	0,99923	2,46E-5

Tabela A.11 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original *cr5210*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	2	0,00E+0	27,15	3,23E-2	1,93E-3	1,43E-5	0,79796	1,66E-3
l1	0	25,07	2	0,00E+0	27,24	4,25E-2	1,89E-3	1,85E-5	0,80043	1,60E-3
SAR	0	25,07	40,8	4,47E-1	26,44	1,63E-2	2,27E-3	8,49E-6	0,77447	1,39E-3
l1SAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	27,01	3,46E-2	1,99E-3	1,58E-5	0,79676	1,61E-3
TVSAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	26,99	2,88E-2	2,00E-3	1,32E-5	0,79424	1,65E-3
TV	0	29,07	2	0,00E+0	29,10	2,16E-2	1,23E-3	6,14E-6	0,86876	1,08E-3
l1	0	29,07	2	0,00E+0	29,09	2,29E-2	1,23E-3	6,52E-6	0,86651	8,47E-4
SAR	0	29,07	16,2	2,95E+0	28,12	1,90E-2	1,54E-3	6,75E-6	0,85275	1,26E-3
l1SAR	0,85	29,07	2,8	4,47E-1	29,01	1,73E-1	1,26E-3	5,13E-5	0,86388	1,21E-3
TVSAR	0,85	29,07	2	0,00E+0	28,88	2,07E-2	1,30E-3	6,18E-6	0,86659	1,11E-3
TV	0	34,07	6,2	4,47E-1	31,84	2,56E-2	6,55E-4	3,85E-6	0,92421	6,53E-4
l1	0	34,07	6	0,00E+0	32,04	2,11E-2	6,26E-4	3,03E-6	0,92571	6,27E-4
SAR	0	34,07	2	0,00E+0	29,98	2,88E-2	1,00E-3	6,66E-6	0,90412	5,41E-4
l1SAR	0,85	34,07	16,8	2,17E+0	31,79	1,72E-2	6,63E-4	2,63E-6	0,92364	5,17E-4
TVSAR	0,85	34,07	18	0,00E+0	31,63	2,24E-2	6,87E-4	3,54E-6	0,92235	5,83E-4
TV	0	39,07	26,4	9,96E+0	34,53	4,60E-2	3,53E-4	3,74E-6	0,96083	3,34E-4
l1	0	39,07	22,6	4,77E+0	34,71	2,28E-2	3,38E-4	1,78E-6	0,96172	3,04E-4
SAR	0	39,07	17,8	1,53E+1	31,98	8,25E-1	6,43E-4	1,17E-4	0,93030	3,01E-4
l1SAR	0,85	39,07	34,6	8,94E-1	34,58	3,17E-2	3,48E-4	2,55E-6	0,96042	2,26E-4
TVSAR	0,85	39,07	34	7,07E-1	34,38	4,52E-2	3,65E-4	3,80E-6	0,95929	3,03E-4
TV	0	44,07	36,8	8,37E-1	38,45	8,06E-2	1,43E-4	2,65E-6	0,98264	3,00E-4
l1	0	44,07	37,6	1,14E+0	38,70	8,10E-2	1,35E-4	2,53E-6	0,98308	2,80E-4
SAR	0	44,07	153,4	2,79E+0	35,96	4,22E-2	2,54E-4	2,46E-6	0,97014	3,02E-4
l1SAR	0,85	44,07	41,8	1,10E+0	38,78	7,42E-2	1,33E-4	2,27E-6	0,98304	2,70E-4
TVSAR	0,85	44,07	41,2	8,37E-1	38,55	7,35E-2	1,40E-4	2,36E-6	0,98258	2,88E-4
TV	0	49,07	45,6	5,48E-1	42,21	1,20E-1	6,01E-5	1,65E-6	0,99265	1,23E-4
l1	0	49,07	46	0,00E+0	42,77	1,02E-1	5,29E-5	1,26E-6	0,99319	9,73E-5
SAR	0	49,07	106,2	2,49E+0	41,97	6,05E-2	6,35E-5	8,82E-7	0,99134	1,76E-4
l1SAR	0,85	49,07	46,6	5,48E-1	42,95	6,88E-2	5,07E-5	8,05E-7	0,99335	6,47E-5
TVSAR	0,85	49,07	46,8	4,47E-1	42,58	7,33E-2	5,52E-5	9,32E-7	0,99298	7,22E-5
TV	0	54,07	95,8	3,63E+0	48,02	6,09E-2	1,58E-5	2,21E-7	0,99765	5,87E-5
l1	0	54,07	87	5,24E+0	48,39	1,35E-1	1,45E-5	4,54E-7	0,99789	5,82E-5
SAR	0	54,07	104,4	1,52E+0	47,68	1,33E-1	1,71E-5	5,22E-7	0,99752	7,88E-5
l1SAR	0,85	54,07	83,6	4,72E+0	48,39	1,27E-1	1,45E-5	4,24E-7	0,99788	5,97E-5
TVSAR	0,85	54,07	92,8	2,95E+0	48,12	1,03E-1	1,54E-5	3,67E-7	0,99768	6,71E-5
TV	0	64,07	114,8	4,09E+0	51,59	9,17E-2	6,93E-6	1,47E-7	0,99921	1,81E-5
l1	0	64,07	102,8	2,86E+0	52,14	7,78E-2	6,11E-6	1,10E-7	0,99933	9,67E-6
SAR	0	64,07	138	4,42E+0	52,26	6,67E-2	5,95E-6	9,10E-8	0,99930	1,01E-5
l1SAR	0,85	64,07	97,8	3,49E+0	52,17	7,05E-2	6,07E-6	9,83E-8	0,99933	9,74E-6
TVSAR	0,85	64,07	111,2	3,27E+0	51,74	1,35E-1	6,70E-6	2,12E-7	0,99923	2,46E-5

Tabela A.12 – Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência MSE, a partir da imagem HR original *cr5210*

Método SR	λ	SNR (dB)	Média		Desvio Padrão	SNR (dB)	Média		Desvio Padrão	SNR (dB)	Média		Desvio Padrão
TV	0	25,07	57,61	2,82E+0	29,07	44,82	6,27E+0	34,07	62,07	6,77E+0	39,07	112,26	1,53E+1
l1	0	25,07	58,80	3,94E+0	29,07	51,65	5,90E+0	34,07	68,31	6,84E+0	39,07	117,23	1,11E+1
SAR	0	25,07	108,95	1,27E+1	29,07	60,04	7,70E+0	34,07	39,69	4,22E+0	39,07	83,13	9,35E+0
l1SAR	0,85	25,07	59,58	6,11E+0	29,07	41,97	4,48E+0	34,07	52,47	6,09E+0	39,07	99,87	1,05E+1
TVSAR	0,85	25,07	59,06	5,60E+0	29,07	40,14	5,54E+0	34,07	52,90	5,53E+0	39,07	96,10	1,02E+1
TV	0	44,07	279,24	2,73E+1	49,07	336,10	2,24E+1	54,07	374,55	2,60E+1	64,07	375,38	3,08E+1
l1	0	44,07	278,87	2,44E+1	49,07	324,06	2,21E+1	54,07	356,09	2,23E+1	64,07	365,53	2,05E+1
SAR	0	44,07	501,17	5,22E+1	49,07	385,60	2,63E+1	54,07	408,96	2,86E+1	64,07	431,01	3,78E+1
l1SAR	0,85	44,07	254,96	2,22E+1	49,07	304,90	2,61E+1	54,07	341,55	1,63E+1	64,07	350,91	2,56E+1
TVSAR	0,85	44,07	252,63	2,32E+1	49,07	313,73	2,37E+1	54,07	355,88	2,04E+1	64,07	361,15	2,81E+1

Tabela A.13 – Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original *cr5210*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	14	0,00E+0	24,32	5,77E-2	3,70E-3	4,92E-5	0,65612	8,51E-4
II	0	25,07	15	0,00E+0	24,16	6,63E-2	3,84E-3	5,86E-5	0,64839	9,85E-4
SAR	0	25,07	27	0,00E+0	26,44	3,66E-2	2,27E-3	1,91E-5	0,77501	2,86E-3
II SAR	0,85	25,07	15,8	4,47E-1	24,82	5,48E-2	3,30E-3	4,17E-5	0,67745	5,29E-4
TV SAR	0,85	25,07	15	0,00E+0	24,89	5,12E-2	3,25E-3	3,83E-5	0,68148	5,12E-4
TV	0	29,07	10	0,00E+0	28,55	1,01E-1	1,40E-3	3,24E-5	0,83662	3,46E-3
II	0	29,07	11	0,00E+0	28,59	1,06E-1	1,38E-3	3,35E-5	0,83475	3,74E-3
SAR	0	29,07	16	0,00E+0	28,12	4,85E-2	1,54E-3	1,72E-5	0,85308	1,95E-3
II SAR	0,85	29,07	10	0,00E+0	28,79	9,92E-2	1,32E-3	3,01E-5	0,84453	3,34E-3
TV SAR	0,85	29,07	10	0,00E+0	28,71	9,59E-2	1,35E-3	2,96E-5	0,84460	3,19E-3
TV	0	34,07	14	0,00E+0	31,84	3,89E-2	6,54E-4	5,86E-6	0,92401	6,68E-4
II	0	34,07	15	0,00E+0	32,02	3,99E-2	6,28E-4	5,77E-6	0,92508	7,04E-4
SAR	0	34,07	5	0,00E+0	29,68	1,09E-2	1,08E-3	2,69E-6	0,90059	4,97E-4
II SAR	0,85	34,07	12	0,00E+0	31,80	3,04E-2	6,61E-4	4,62E-6	0,92377	7,37E-4
TV SAR	0,85	34,07	12	0,00E+0	31,64	2,82E-2	6,85E-4	4,43E-6	0,92249	6,96E-4
TV	0	39,07	26	1,41E+0	34,51	4,63E-2	3,54E-4	3,78E-6	0,96077	3,62E-4
II	0	39,07	26,6	5,48E-1	34,71	3,56E-2	3,38E-4	2,77E-6	0,96181	4,16E-4
SAR	0	39,07	19,6	5,48E-1	31,33	1,77E-2	7,36E-4	3,01E-6	0,92951	2,73E-4
II SAR	0,85	39,07	25,8	1,64E+0	34,56	3,73E-2	3,50E-4	3,01E-6	0,96040	4,78E-4
TV SAR	0,85	39,07	23	0,00E+0	34,34	3,28E-2	3,68E-4	2,78E-6	0,95912	3,90E-4
TV	0	44,07	58,2	1,64E+0	38,58	7,59E-2	1,39E-4	2,40E-6	0,98203	3,64E-4
II	0	44,07	56,4	5,48E-1	38,78	6,30E-2	1,33E-4	1,92E-6	0,98261	2,68E-4
SAR	0	44,07	39	0,00E+0	32,87	1,43E-2	5,16E-4	1,70E-6	0,94809	9,79E-5
II SAR	0,85	44,07	53,8	4,47E-1	38,87	5,59E-2	1,30E-4	1,66E-6	0,98291	2,60E-4
TV SAR	0,85	44,07	55,4	5,48E-1	38,69	6,38E-2	1,35E-4	1,97E-6	0,98245	3,03E-4
TV	0	49,07	75,6	1,82E+0	42,53	5,13E-2	5,58E-5	6,60E-7	0,99171	1,04E-4
II	0	49,07	71,4	1,82E+0	42,92	6,85E-2	5,10E-5	8,02E-7	0,99238	8,92E-5
SAR	0	49,07	104,4	8,94E-1	41,84	7,64E-2	6,55E-5	1,16E-6	0,99112	1,46E-4
II SAR	0,85	49,07	70,2	1,64E+0	43,07	6,90E-2	4,94E-5	7,86E-7	0,99253	6,70E-5
TV SAR	0,85	49,07	72,8	8,37E-1	42,74	6,75E-2	5,32E-5	8,27E-7	0,99200	1,01E-4
TV	0	54,07	83,6	1,34E+0	47,66	2,06E-1	1,72E-5	8,31E-7	0,99755	1,01E-4
II	0	54,07	79	1,00E+0	48,16	2,09E-1	1,53E-5	7,53E-7	0,99782	9,40E-5
SAR	0	54,07	108,2	1,30E+0	47,78	1,47E-1	1,67E-5	5,70E-7	0,99748	8,78E-5
II SAR	0,85	54,07	76,6	1,34E+0	48,23	2,27E-1	1,51E-5	8,06E-7	0,99782	8,36E-5
TV SAR	0,85	54,07	81,4	1,14E+0	47,86	2,07E-1	1,64E-5	7,99E-7	0,99761	9,42E-5
TV	0	64,07	83,8	4,47E-1	50,25	1,06E-1	9,44E-6	2,28E-7	0,99896	2,55E-5
II	0	64,07	77	2,65E+0	50,90	2,33E-1	8,15E-6	4,50E-7	0,99914	4,24E-5
SAR	0	64,07	111,6	5,48E-1	51,79	7,75E-2	6,63E-6	1,18E-7	0,99924	1,61E-5
II SAR	0,85	64,07	76,8	1,48E+0	51,18	1,50E-1	7,63E-6	2,58E-7	0,99918	2,42E-5
TV SAR	0,85	64,07	80	1,22E+0	50,61	5,09E-2	8,69E-6	1,02E-7	0,99904	1,22E-5

Tabela A.14 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR dos testes feitos com convergência baseada em PSNR, a partir da imagem HR original *cr5210*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	2	0,00E+0	27,12	4,58E-2	1,94E-3	2,04E-5	0,79816	3,05E-3
l1	0	25,07	2	0,00E+0	27,25	6,44E-2	1,88E-3	2,79E-5	0,80097	3,60E-3
SAR	0	25,07	27	0,00E+0	26,44	3,66E-2	2,27E-3	1,91E-5	0,77501	2,86E-3
l1SAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	27,03	5,78E-2	1,98E-3	2,64E-5	0,79744	3,56E-3
TVSAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	26,98	4,34E-2	2,01E-3	2,00E-5	0,79462	3,04E-3
<hr/>										
TV	0	29,07	3	0,00E+0	29,16	8,74E-2	1,21E-3	2,44E-5	0,86274	2,51E-3
l1	0	29,07	3	0,00E+0	29,41	7,69E-2	1,15E-3	2,03E-5	0,86569	2,29E-3
SAR	0	29,07	4,6	5,48E-1	28,29	6,93E-2	1,48E-3	2,36E-5	0,84699	1,92E-3
l1SAR	0,85	29,07	3	0,00E+0	29,08	7,45E-2	1,24E-3	2,12E-5	0,86405	2,27E-3
TVSAR	0,85	29,07	3	0,00E+0	28,97	8,13E-2	1,27E-3	2,37E-5	0,86078	2,48E-3
<hr/>										
TV	0	34,07	7,4	5,48E-1	31,86	3,51E-2	6,52E-4	5,26E-6	0,92441	6,42E-4
l1	0	34,07	6,4	5,48E-1	32,06	3,58E-2	6,22E-4	5,11E-6	0,92593	7,12E-4
SAR	0	34,07	2	0,00E+0	29,99	1,06E-2	1,00E-3	2,45E-6	0,90426	5,81E-4
l1SAR	0,85	34,07	12	0,00E+0	31,80	3,04E-2	6,61E-4	4,62E-6	0,92377	7,37E-4
TVSAR	0,85	34,07	12	0,00E+0	31,64	2,82E-2	6,85E-4	4,43E-6	0,92249	6,96E-4
<hr/>										
TV	0	39,07	21,4	3,78E+0	34,51	4,29E-2	3,54E-4	3,50E-6	0,96079	3,52E-4
l1	0	39,07	24,4	2,41E+0	34,71	3,63E-2	3,38E-4	2,82E-6	0,96181	4,20E-4
SAR	0	39,07	1	0,00E+0	32,79	3,70E-2	5,26E-4	4,49E-6	0,92931	5,99E-4
l1SAR	0,85	39,07	25,8	1,64E+0	34,56	3,73E-2	3,50E-4	3,01E-6	0,96040	4,78E-4
TVSAR	0,85	39,07	23	0,00E+0	34,34	3,28E-2	3,68E-4	2,78E-6	0,95912	3,90E-4
<hr/>										
TV	0	44,07	52,8	4,97E+0	38,59	7,15E-2	1,38E-4	2,26E-6	0,98219	3,08E-4
l1	0	44,07	53,8	3,49E+0	38,78	6,24E-2	1,32E-4	1,90E-6	0,98267	2,46E-4
SAR	0	44,07	1	0,00E+0	34,91	2,00E-2	3,23E-4	1,48E-6	0,96340	3,24E-4
l1SAR	0,85	44,07	53,8	4,47E-1	38,87	5,59E-2	1,30E-4	1,66E-6	0,98291	2,60E-4
TVSAR	0,85	44,07	55,4	5,48E-1	38,69	6,38E-2	1,35E-4	1,97E-6	0,98245	3,03E-4
<hr/>										
TV	0	49,07	75,6	1,82E+0	42,53	5,13E-2	5,58E-5	6,60E-7	0,99171	1,04E-4
l1	0	49,07	71,4	1,82E+0	42,92	6,85E-2	5,10E-5	8,02E-7	0,99238	8,92E-5
SAR	0	49,07	104,4	8,94E-1	41,84	7,64E-2	6,55E-5	1,16E-6	0,99112	1,46E-4
l1SAR	0,85	49,07	67,6	6,15E+0	43,07	6,84E-2	4,93E-5	7,80E-7	0,99261	1,35E-4
TVSAR	0,85	49,07	71,6	3,21E+0	42,75	5,51E-2	5,30E-5	6,73E-7	0,99204	6,93E-5
<hr/>										
TV	0	54,07	83,6	1,34E+0	47,66	2,06E-1	1,72E-5	8,31E-7	0,99755	1,01E-4
l1	0	54,07	79	1,00E+0	48,16	2,09E-1	1,53E-5	7,53E-7	0,99782	9,40E-5
SAR	0	54,07	108,2	1,30E+0	47,78	1,47E-1	1,67E-5	5,70E-7	0,99748	8,78E-5
l1SAR	0,85	54,07	76,6	1,34E+0	48,23	2,27E-1	1,51E-5	8,06E-7	0,99782	8,36E-5
TVSAR	0,85	54,07	81,4	1,14E+0	47,86	2,07E-1	1,64E-5	7,99E-7	0,99761	9,42E-5
<hr/>										
TV	0	64,07	83,8	4,47E-1	50,25	1,06E-1	9,44E-6	2,28E-7	0,99896	2,55E-5
l1	0	64,07	77	2,65E+0	50,90	2,33E-1	8,15E-6	4,50E-7	0,99914	4,24E-5
SAR	0	64,07	111,6	5,48E-1	51,79	7,75E-2	6,63E-6	1,18E-7	0,99924	1,61E-5
l1SAR	0,85	64,07	76,8	1,48E+0	51,18	1,50E-1	7,63E-6	2,58E-7	0,99918	2,42E-5
TVSAR	0,85	64,07	80	1,22E+0	50,61	5,09E-2	8,69E-6	1,02E-7	0,99904	1,22E-5

Tabela A.15 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original *cr5210*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	2	0,00E+0	27,12	4,58E-2	1,94E-3	2,04E-5	0,79816	3,05E-3
II	0	25,07	2	0,00E+0	27,25	6,44E-2	1,88E-3	2,79E-5	0,80097	3,60E-3
SAR	0	25,07	27	0,00E+0	26,44	3,66E-2	2,27E-3	1,91E-5	0,77501	2,86E-3
II SAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	27,03	5,78E-2	1,98E-3	2,64E-5	0,79744	3,56E-3
TV SAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	26,98	4,34E-2	2,01E-3	2,00E-5	0,79462	3,04E-3
TV	0	29,07	2	0,00E+0	29,10	5,81E-2	1,23E-3	1,64E-5	0,86874	1,51E-3
II	0	29,07	2,6	5,48E-1	29,28	2,36E-1	1,18E-3	6,45E-5	0,86637	1,32E-3
SAR	0	29,07	12,8	1,92E+0	28,13	5,59E-2	1,54E-3	1,97E-5	0,85310	1,96E-3
II SAR	0,85	29,07	3	0,00E+0	29,08	7,45E-2	1,24E-3	2,12E-5	0,86405	2,27E-3
TV SAR	0,85	29,07	2	0,00E+0	28,87	5,58E-2	1,30E-3	1,66E-5	0,86659	1,62E-3
TV	0	34,07	6,4	5,48E-1	31,86	3,59E-2	6,52E-4	5,39E-6	0,92446	5,90E-4
II	0	34,07	6	0,00E+0	32,06	3,58E-2	6,22E-4	5,12E-6	0,92596	6,58E-4
SAR	0	34,07	2	0,00E+0	29,99	1,06E-2	1,00E-3	2,45E-6	0,90426	5,81E-4
II SAR	0,85	34,07	11,6	8,94E-1	31,80	3,18E-2	6,61E-4	4,82E-6	0,92377	7,36E-4
TV SAR	0,85	34,07	12	0,00E+0	31,64	2,82E-2	6,85E-4	4,43E-6	0,92249	6,96E-4
TV	0	39,07	22	3,24E+0	34,51	4,33E-2	3,54E-4	3,53E-6	0,96080	3,50E-4
II	0	39,07	23	2,00E+0	34,71	3,62E-2	3,38E-4	2,82E-6	0,96182	4,19E-4
SAR	0	39,07	16	8,40E+0	31,63	6,71E-1	6,92E-4	9,61E-5	0,92966	4,41E-4
II SAR	0,85	39,07	25,8	1,64E+0	34,56	3,73E-2	3,50E-4	3,01E-6	0,96040	4,78E-4
TV SAR	0,85	39,07	23	0,00E+0	34,34	3,28E-2	3,68E-4	2,78E-6	0,95912	3,90E-4
TV	0	44,07	36,6	8,94E-1	38,48	6,69E-2	1,42E-4	2,17E-6	0,98270	1,94E-4
II	0	44,07	37,8	8,37E-1	38,69	5,80E-2	1,35E-4	1,80E-6	0,98302	2,13E-4
SAR	0	44,07	1	0,00E+0	34,91	2,00E-2	3,23E-4	1,48E-6	0,96340	3,24E-4
II SAR	0,85	44,07	42	1,73E+0	38,79	6,68E-2	1,32E-4	2,01E-6	0,98304	2,24E-4
TV SAR	0,85	44,07	42,2	2,17E+0	38,60	8,33E-2	1,38E-4	2,62E-6	0,98268	2,24E-4
TV	0	49,07	45,4	5,48E-1	42,14	4,11E-2	6,11E-5	5,78E-7	0,99252	4,42E-5
II	0	49,07	45,2	4,47E-1	42,63	7,06E-2	5,46E-5	8,85E-7	0,99304	6,68E-5
SAR	0	49,07	104,2	1,10E+0	41,84	7,83E-2	6,55E-5	1,19E-6	0,99112	1,45E-5
II SAR	0,85	49,07	46,4	8,94E-1	42,83	6,65E-2	5,22E-5	7,98E-7	0,99318	8,12E-5
TV SAR	0,85	49,07	46,8	4,47E-1	42,47	7,29E-2	5,66E-5	9,50E-7	0,99280	6,30E-5
TV	0	54,07	83,6	1,34E+0	47,66	2,06E-1	1,72E-5	8,31E-7	0,99755	1,01E-4
II	0	54,07	79	1,00E+0	48,16	2,09E-1	1,53E-5	7,53E-7	0,99782	9,40E-5
SAR	0	54,07	104,2	1,79E+0	47,70	1,74E-1	1,70E-5	6,87E-7	0,99749	8,14E-5
II SAR	0,85	54,07	76,6	1,34E+0	48,23	2,27E-1	1,51E-5	8,06E-7	0,99782	8,36E-5
TV SAR	0,85	54,07	81,4	1,14E+0	47,86	2,07E-1	1,64E-5	7,99E-7	0,99761	9,42E-5
TV	0	64,07	83,8	4,47E-1	50,25	1,06E-1	9,44E-6	2,28E-7	0,99896	2,55E-5
II	0	64,07	77	2,65E+0	50,90	2,33E-1	8,15E-6	4,50E-7	0,99914	4,24E-5
SAR	0	64,07	111,6	5,48E-1	51,79	7,75E-2	6,63E-6	1,18E-7	0,99924	1,61E-5
II SAR	0,85	64,07	76,8	1,48E+0	51,18	1,50E-1	7,63E-6	2,58E-7	0,99918	2,42E-5
TV SAR	0,85	64,07	80	1,22E+0	50,61	5,09E-2	8,69E-6	1,02E-7	0,99904	1,22E-5

Tabela A.16 – Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência SSIM, a partir da imagem HR original *cr5210*

Método SR	λ	SNR (dB)	Média		Desvio Padrão	SNR (dB)	Média		Desvio Padrão	SNR (dB)	Média		Desvio Padrão
TV	0	25,07	42,20	2,82E+0	29,07	30,98	2,10E+0	34,07	42,20	2,63E+0	39,07	74,47	8,31E+0
II	0	25,07	44,33	2,78E+0	29,07	33,92	2,09E+0	34,07	46,05	3,04E+0	39,07	77,92	5,10E+0
SAR	0	25,07	72,18	4,98E+0	29,07	45,61	3,36E+0	34,07	18,08	9,97E-1	39,07	55,86	3,25E+0
II SAR	0,85	25,07	44,86	2,54E+0	29,07	30,45	2,19E+0	34,07	36,65	2,15E+0	39,07	73,88	6,97E+0
TV SAR	0,85	25,07	43,28	3,07E+0	29,07	30,67	1,40E+0	34,07	36,11	2,15E+0	39,07	65,38	4,34E+0
TV	0	44,07	202,63	1,26E+1	49,07	267,58	1,86E+1	54,07	294,78	1,84E+1	64,07	292,21	2,03E+1
II	0	44,07	198,22	1,39E+1	49,07	253,72	1,69E+1	54,07	276,80	1,80E+1	64,07	269,30	1,72E+1
SAR	0	44,07	112,46	6,89E+0	49,07	347,29	2,69E+1	54,07	345,88	1,98E+1	64,07	356,22	2,38E+1
II SAR	0,85	44,07	186,37	1,34E+1	49,07	246,52	1,36E+1	54,07	264,78	1,65E+1	64,07	264,26	1,74E+1
TV SAR	0,85	44,07	192,02	1,28E+1	49,07	254,44	1,97E+1	54,07	278,30	1,86E+1	64,07	274,98	1,63E+1

Tabela A.17 – Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original *cra5302*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	19,4	5,48E-1	28,87	5,70E-2	1,30E-3	1,70E-5	0,86023	1,28E-3
l1	0	25,07	23,8	8,37E-1	28,69	5,96E-2	1,35E-3	1,85E-5	0,85727	1,36E-3
SAR	0	25,07	17	0,00E+0	28,70	3,51E-2	1,35E-3	1,09E-5	0,86310	1,22E-3
l1SAR	0,85	25,07	12	0,00E+0	29,07	5,09E-2	1,24E-3	1,45E-5	0,86422	1,36E-3
TVSAR	0,85	25,07	11	0,00E+0	29,11	4,88E-2	1,23E-3	1,38E-5	0,86504	1,32E-3
TV		29,07	26	0,00E+0	30,69	3,82E-2	8,54E-4	7,46E-6	0,90939	4,95E-4
l1	0	29,07	32,2	1,10E+0	30,50	4,10E-2	8,90E-4	8,36E-6	0,90812	5,25E-4
SAR	0	29,07	16	0,00E+0	29,80	1,31E-2	1,05E-3	3,15E-6	0,89617	4,09E-4
l1SAR	0,85	29,07	21	0,00E+0	30,79	2,43E-2	8,34E-4	4,65E-6	0,91010	5,13E-4
TVSAR	0,85	29,07	21	0,00E+0	30,80	2,35E-2	8,31E-4	4,49E-6	0,91007	5,04E-4
TV		34,07	44,2	8,37E-1	32,17	6,95E-2	6,07E-4	9,79E-6	0,94040	6,14E-4
l1	0	34,07	51,2	1,10E+0	31,99	7,99E-2	6,33E-4	1,17E-5	0,93919	6,96E-4
SAR	0	34,07	26,2	4,47E-1	30,84	4,64E-2	8,25E-4	8,82E-7	0,92003	2,41E-4
l1SAR	0,85	34,07	39,2	1,10E+0	32,38	4,18E-2	5,78E-4	5,58E-6	0,94022	5,62E-4
TVSAR	0,85	34,07	34	0,00E+0	32,29	3,52E-2	5,90E-4	4,80E-6	0,93959	5,03E-4
TV		39,07	113,6	1,34E+0	37,60	9,00E-2	1,74E-4	3,61E-6	0,97642	4,06E-4
l1	0	39,07	118,8	2,17E+0	37,46	9,56E-2	1,80E-4	3,98E-6	0,97600	4,29E-4
SAR	0	39,07	37,4	6,50E+0	31,24	4,74E-2	7,51E-4	8,18E-6	0,92747	5,12E-4
l1SAR	0,85	39,07	112,4	3,58E+0	38,11	7,66E-2	1,55E-4	2,71E-6	0,97802	3,26E-4
TVSAR	0,85	39,07	113,8	2,59E+0	38,16	7,80E-2	1,53E-4	2,72E-6	0,97826	3,34E-4
TV		44,07	142,4	1,82E+0	42,00	1,03E-1	6,31E-5	1,50E-6	0,99109	2,73E-4
l1	0	44,07	141,4	7,27E+0	41,97	2,10E-1	6,37E-5	3,11E-6	0,99110	2,32E-4
SAR	0	44,07	37,6	5,48E-1	31,35	1,31E-3	7,32E-4	2,20E-7	0,92910	2,99E-5
l1SAR	0,85	44,07	131,6	2,07E+0	42,41	1,13E-1	5,74E-5	1,49E-6	0,99170	2,27E-4
TVSAR	0,85	44,07	129,8	1,30E+0	42,36	1,04E-1	5,81E-5	1,39E-6	0,99164	2,40E-4
TV		49,07	154,2	4,32E+0	47,37	2,68E-1	1,83E-5	1,14E-6	0,99782	1,59E-4
l1	0	49,07	158,4	2,07E+0	47,40	1,91E-1	1,82E-5	7,93E-7	0,99782	1,35E-4
SAR	0	49,07	37,6	5,48E-1	31,36	1,16E-3	7,31E-4	1,95E-7	0,92920	1,65E-5
l1SAR	0,85	49,07	149,8	2,86E+0	47,66	2,33E-1	1,71E-5	9,03E-7	0,99791	1,46E-4
TVSAR	0,85	49,07	147,8	1,48E+0	47,60	2,06E-1	1,74E-5	8,23E-7	0,99789	1,43E-4
TV		54,07	157,8	2,39E+0	49,61	8,30E-2	1,10E-5	2,09E-7	0,99901	1,68E-5
l1	0	54,07	158,8	4,32E+0	49,72	9,26E-2	1,07E-5	2,28E-7	0,99903	1,78E-5
SAR	0	54,07	37,8	4,47E-1	31,36	6,59E-3	7,31E-4	1,11E-6	0,92925	8,96E-5
l1SAR	0,85	54,07	150,6	3,36E+0	49,90	1,45E-1	1,02E-5	3,45E-7	0,99906	3,11E-5
TVSAR	0,85	54,07	150	1,58E+0	49,92	7,46E-2	1,02E-5	1,75E-7	0,99907	1,69E-5
TV		64,07	157,4	1,14E+0	49,93	1,16E-1	1,02E-5	2,71E-7	0,99915	2,23E-5
l1	0	64,07	161,6	1,14E+0	50,11	1,11E-1	9,74E-6	2,51E-7	0,99919	2,01E-5
SAR	0	64,07	37,8	4,47E-1	31,36	6,87E-4	7,31E-4	1,16E-7	0,92921	8,15E-6
l1SAR	0,85	64,07	152,6	1,14E+0	50,26	1,06E-1	9,42E-6	2,30E-7	0,99920	1,83E-5
TVSAR	0,85	64,07	148,8	4,71E+0	50,16	1,14E-1	9,63E-6	2,52E-7	0,99919	2,00E-5

Tabela A.18 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original *cra5302*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	3	0,00E+0	29,24	5,30E-2	1,19E-3	1,45E-5	0,86970	1,21E-3
l1	0	25,07	3	0,00E+0	29,14	5,09E-2	1,22E-3	1,43E-5	0,86914	1,14E-3
SAR	0	25,07	3	0,00E+0	28,87	4,31E-2	1,30E-3	1,29E-5	0,86434	1,46E-3
l1SAR	0,85	25,07	3	0,00E+0	29,18	4,26E-2	1,21E-3	1,18E-5	0,86942	1,21E-3
TVSAR	0,85	25,07	3	0,00E+0	29,21	4,68E-2	1,20E-3	1,29E-5	0,86931	1,26E-3
TV	0	29,07	5,2	4,47E-1	30,81	2,76E-2	8,30E-4	5,27E-6	0,90985	5,62E-4
l1	0	29,07	5,2	4,47E-1	30,70	2,68E-2	8,51E-4	5,24E-6	0,90964	5,59E-4
SAR	0	29,07	16	0,00E+0	29,80	1,31E-2	1,05E-3	3,15E-6	0,89617	4,09E-4
l1SAR	0,85	29,07	21	0,00E+0	30,79	2,43E-2	8,34E-4	4,65E-6	0,91010	5,13E-4
TVSAR	0,85	29,07	21	0,00E+0	30,80	2,35E-2	8,31E-4	4,49E-6	0,91007	5,04E-4
TV	0	34,07	25,6	1,14E+0	32,19	6,92E-2	6,05E-4	9,71E-6	0,94027	5,86E-4
l1	0	34,07	20	7,07E-1	32,04	7,26E-2	6,25E-4	1,05E-5	0,93910	6,46E-4
SAR	0	34,07	1	0,00E+0	31,48	4,54E-2	7,12E-4	7,47E-6	0,92939	1,33E-3
l1SAR	0,85	34,07	39,2	1,10E+0	32,38	4,18E-2	5,78E-4	5,58E-6	0,94022	5,62E-4
TVSAR	0,85	34,07	34	0,00E+0	32,29	3,52E-2	5,90E-4	4,80E-6	0,93959	5,03E-4
TV	0	39,07	83	8,22E+0	37,62	8,49E-2	1,73E-4	3,39E-6	0,97678	2,59E-4
l1	0	39,07	93,4	7,02E+0	37,47	9,41E-2	1,79E-4	3,91E-6	0,97612	3,67E-4
SAR	0	39,07	1	0,00E+0	32,40	1,67E-2	5,75E-4	2,21E-6	0,94869	2,77E-4
l1SAR	0,85	39,07	90	5,34E+0	38,12	7,40E-2	1,54E-4	2,61E-6	0,97810	2,98E-4
TVSAR	0,85	39,07	89	3,39E+0	38,18	7,25E-2	1,52E-4	2,52E-6	0,97842	2,89E-4
TV	0	44,07	124	1,58E+0	42,03	1,03E-1	6,27E-5	1,48E-6	0,99116	2,65E-4
l1	0	44,07	116,8	8,04E+0	42,01	2,01E-1	6,30E-5	2,94E-6	0,99121	2,37E-4
SAR	0	44,07	1	0,00E+0	32,50	4,30E-3	5,62E-4	5,57E-7	0,95084	9,86E-5
l1SAR	0,85	44,07	112	2,00E+0	42,45	1,14E-1	5,69E-5	1,49E-6	0,99180	2,21E-4
TVSAR	0,85	44,07	113,4	2,70E+0	42,39	9,92E-2	5,76E-5	1,32E-6	0,99173	2,20E-4
TV	0	49,07	152,4	5,46E+0	47,37	2,68E-1	1,83E-5	1,14E-6	0,99782	1,58E-4
l1	0	49,07	157,6	3,21E+0	47,40	1,91E-1	1,82E-5	7,93E-7	0,99782	1,35E-4
SAR	0	49,07	1	0,00E+0	32,51	1,52E-3	5,61E-4	1,97E-7	0,95100	2,63E-5
l1SAR	0,85	49,07	136,2	9,15E+0	47,67	2,28E-1	1,71E-5	8,83E-7	0,99792	1,41E-4
TVSAR	0,85	49,07	135,2	8,76E+0	47,60	2,01E-1	1,74E-5	8,03E-7	0,99790	1,38E-4
TV	0	54,07	157,8	2,39E+0	49,61	8,30E-2	1,10E-5	2,09E-7	0,99901	1,68E-5
l1	0	54,07	158,8	4,32E+0	49,72	9,26E-2	1,07E-5	2,28E-7	0,99903	1,78E-5
SAR	0	54,07	1	0,00E+0	32,51	8,92E-3	5,61E-4	1,15E-6	0,95103	7,91E-5
l1SAR	0,85	54,07	150,6	3,36E+0	49,90	1,45E-1	1,02E-5	3,45E-7	0,99906	3,11E-5
TVSAR	0,85	54,07	150	1,58E+0	49,92	7,46E-2	1,02E-5	1,75E-7	0,99907	1,69E-5
TV	0	64,07	157,4	1,14E+0	49,93	1,16E-1	1,02E-5	2,71E-7	0,99915	2,23E-5
l1	0	64,07	161,6	1,14E+0	50,11	1,11E-1	9,74E-6	2,51E-7	0,99919	2,01E-5
SAR	0	64,07	1	0,00E+0	32,51	1,60E-3	5,61E-4	2,06E-7	0,95101	1,34E-5
l1SAR	0,85	64,07	152,6	1,14E+0	50,26	1,06E-1	9,42E-6	2,30E-7	0,99920	1,83E-5
TVSAR	0,85	64,07	148,8	4,71E+0	50,16	1,14E-1	9,63E-6	2,52E-7	0,99919	2,00E-5

Tabela A.19 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original *cra5302*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	3	0,00E+0	29,24	5,30E-2	1,19E-3	1,45E-5	0,86970	1,21E-3
II	0	25,07	3	0,00E+0	29,14	5,09E-2	1,22E-3	1,43E-5	0,86914	1,14E-3
SAR	0	25,07	5	0,00E+0	28,83	4,02E-2	1,31E-3	1,21E-5	0,86474	1,39E-3
II SAR	0,85	25,07	3	0,00E+0	29,18	4,26E-2	1,21E-3	1,18E-5	0,86942	1,21E-3
TV SAR	0,85	25,07	3	0,00E+0	29,21	4,68E-2	1,20E-3	1,29E-5	0,86931	1,26E-3
TV	0	29,07	7	0,00E+0	30,79	3,06E-2	8,34E-4	5,85E-6	0,91018	5,15E-4
II	0	29,07	6	0,00E+0	30,69	2,98E-2	8,52E-4	5,84E-6	0,90979	5,48E-4
SAR	0	29,07	16	0,00E+0	29,80	1,31E-2	1,05E-3	3,15E-6	0,89617	4,09E-4
II SAR	0,85	29,07	19,8	2,68E+0	30,79	2,43E-2	8,34E-4	4,66E-6	0,91010	5,13E-4
TV SAR	0,85	29,07	21	0,00E+0	30,80	2,35E-2	8,31E-4	4,49E-6	0,91007	5,04E-4
TV	0	34,07	44,2	8,37E-1	32,17	6,95E-2	6,07E-4	9,79E-6	0,94040	6,14E-4
II	0	34,07	26,8	2,77E+0	32,01	7,06E-2	6,29E-4	1,03E-5	0,93922	6,76E-4
SAR	0	34,07	1	0,00E+0	31,48	4,54E-2	7,12E-4	7,47E-6	0,92939	1,33E-3
II SAR	0,85	34,07	39,2	1,10E+0	32,38	4,18E-2	5,78E-4	5,58E-6	0,94022	5,62E-4
TV SAR	0,85	34,07	34	0,00E+0	32,29	3,52E-2	5,90E-4	4,80E-6	0,93959	5,03E-4
TV	0	39,07	67,4	5,48E-1	37,55	7,99E-2	1,76E-4	3,22E-6	0,97718	3,22E-4
II	0	39,07	68,2	2,68E+0	37,37	9,62E-2	1,83E-4	4,07E-6	0,97648	3,04E-4
SAR	0	39,07	1	0,00E+0	32,40	1,67E-2	5,75E-4	2,21E-6	0,94869	2,77E-4
II SAR	0,85	39,07	75,4	3,97E+0	38,10	7,45E-2	1,55E-4	2,65E-6	0,97819	2,66E-4
TV SAR	0,85	39,07	79	1,58E+0	38,17	7,20E-2	1,53E-4	2,51E-6	0,97852	2,95E-4
TV	0	44,07	105,6	1,11E+1	41,89	2,19E-1	6,48E-5	3,32E-6	0,99120	2,47E-4
II	0	44,07	101,8	5,02E+0	41,92	2,02E-1	6,44E-5	3,00E-6	0,99125	2,20E-4
SAR	0	44,07	1	0,00E+0	32,50	4,30E-3	5,62E-4	5,57E-7	0,95084	9,86E-5
II SAR	0,85	44,07	88,2	3,49E+0	42,25	1,67E-1	5,96E-5	2,29E-6	0,99188	2,02E-4
TV SAR	0,85	44,07	84,8	5,02E+0	42,11	1,75E-1	6,15E-5	2,45E-6	0,99184	1,66E-4
TV	0	49,07	141,2	7,26E+0	47,36	2,71E-1	1,84E-5	1,15E-6	0,99782	1,56E-4
II	0	49,07	146	1,16E+1	47,40	1,95E-1	1,82E-5	8,10E-7	0,99782	1,33E-4
SAR	0	49,07	1	0,00E+0	32,51	1,52E-3	5,61E-4	1,97E-7	0,95100	2,63E-5
II SAR	0,85	49,07	129,6	7,27E+0	47,67	2,30E-1	1,71E-5	8,89E-7	0,99792	1,40E-4
TV SAR	0,85	49,07	130	1,03E+1	47,60	2,04E-1	1,74E-5	8,13E-7	0,99790	1,36E-4
TV	0	54,07	157,8	2,39E+0	49,61	8,30E-2	1,10E-5	2,09E-7	0,99901	1,68E-5
II	0	54,07	158,8	4,32E+0	49,72	9,26E-2	1,07E-5	2,28E-7	0,99903	1,78E-5
SAR	0	54,07	1	0,00E+0	32,51	8,92E-3	5,61E-4	1,15E-6	0,95103	7,91E-5
II SAR	0,85	54,07	150,6	3,36E+0	49,90	1,45E-1	1,02E-5	3,45E-7	0,99906	3,11E-5
TV SAR	0,85	54,07	150	1,58E+0	49,92	7,46E-2	1,02E-5	1,75E-7	0,99907	1,69E-5
TV	0	64,07	157,4	1,14E+0	49,93	1,16E-1	1,02E-5	2,71E-7	0,99915	2,23E-5
II	0	64,07	161,6	1,14E+0	50,11	1,11E-1	9,74E-6	2,51E-7	0,99919	2,01E-5
SAR	0	64,07	1	0,00E+0	32,51	1,60E-3	5,61E-4	2,06E-7	0,95101	1,34E-5
II SAR	0,85	64,07	152,6	1,14E+0	50,26	1,06E-1	9,42E-6	2,30E-7	0,99920	1,83E-5
TV SAR	0,85	64,07	148,8	4,71E+0	50,16	1,14E-1	9,63E-6	2,52E-7	0,99919	2,00E-5

Tabela A.20 – Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência MSE, a partir da imagem HR original *cra5302*

Método SR	λ	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	57,61	3,89E+0	34,07	126,74	6,81E+0	44,07	481,07	2,70E+1	54,07	516,63	2,62E+1
II	0	25,07	69,06	2,16E+0	34,07	144,23	6,27E+0	44,07	476,47	2,69E+1	54,07	524,45	3,75E+1
SAR	0	25,07	49,59	3,13E+0	34,07	74,72	4,23E+0	44,07	107,23	6,09E+0	54,07	108,97	6,98E+0
II SAR	0,85	25,07	37,20	1,98E+0	34,07	108,76	5,07E+0	44,07	437,38	2,13E+1	54,07	495,26	3,28E+1
TV SAR	0,85	25,07	34,90	1,92E+0	34,07	94,30	5,68E+0	44,07	430,74	2,56E+1	54,07	487,22	3,43E+1
TV	0	29,07	74,96	4,48E+0	39,07	383,30	2,24E+1	49,07	509,80	3,33E+1	64,07	512,51	4,04E+1
II	0	29,07	92,38	5,26E+0	39,07	396,42	2,78E+1	49,07	519,62	2,87E+1	64,07	536,35	4,98E+1
SAR	0	29,07	48,95	2,47E+0	39,07	103,39	1,68E+1	49,07	104,35	5,52E+0	64,07	109,35	9,80E+0
II SAR	0,85	29,07	62,12	3,11E+0	39,07	371,45	2,06E+1	49,07	480,92	2,77E+1	64,07	500,68	5,20E+1
TV SAR	0,85	29,07	61,96	3,01E+0	39,07	377,58	2,40E+1	49,07	474,76	2,08E+1	64,07	489,96	5,84E+1

Tabela A.21 – Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original *cra5302*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	9,8	4,47E-1	28,89	5,97E-2	1,29E-3	1,78E-5	0,86027	9,80E-4
II	0	25,07	11,6	5,48E-1	28,72	6,28E-2	1,34E-3	1,95E-5	0,85756	9,88E-4
SAR	0	25,07	13	0,00E+0	28,71	2,69E-2	1,35E-3	8,34E-6	0,86313	1,07E-3
II SAR	0,85	25,07	9	0,00E+0	29,08	4,99E-2	1,24E-3	1,42E-5	0,86437	9,65E-4
TVSAR	0,85	25,07	8	0,00E+0	29,11	4,73E-2	1,23E-3	1,34E-5	0,86504	9,48E-4
TV	0	29,07	16	0,00E+0	30,67	2,47E-2	8,58E-4	4,88E-6	0,90861	4,32E-4
II	0	29,07	17	0,00E+0	30,50	3,59E-2	8,92E-4	7,39E-6	0,90729	5,34E-4
SAR	0	29,07	12	0,00E+0	29,79	1,39E-2	1,05E-3	3,35E-6	0,89564	3,88E-4
II SAR	0,85	29,07	14	0,00E+0	30,77	2,02E-2	8,37E-4	3,90E-6	0,90949	4,42E-4
TVSAR	0,85	29,07	14	0,00E+0	30,78	1,97E-2	8,35E-4	3,79E-6	0,90939	4,40E-4
TV	0	34,07	28	1,87E+0	32,14	5,68E-2	6,11E-4	8,01E-6	0,93969	3,58E-4
II	0	34,07	28,8	4,47E-1	32,00	4,41E-2	6,32E-4	6,45E-6	0,93863	5,04E-4
SAR	0	34,07	18	0,00E+0	30,82	7,72E-3	8,28E-4	1,47E-6	0,91957	1,15E-4
II SAR	0,85	34,07	22,6	1,34E+0	32,27	5,70E-2	5,93E-4	7,75E-6	0,93909	2,92E-4
TVSAR	0,85	34,07	22	0,00E+0	32,27	2,27E-2	5,92E-4	3,10E-6	0,93899	1,79E-4
TV	0	39,07	91,8	1,30E+0	37,57	8,95E-2	1,75E-4	3,59E-6	0,97626	6,88E-4
II	0	39,07	91	1,58E+0	37,45	9,38E-2	1,80E-4	3,83E-6	0,97601	6,23E-4
SAR	0	39,07	21	0,00E+0	31,18	3,30E-3	7,62E-4	5,80E-7	0,92664	3,73E-5
II SAR	0,85	39,07	86,8	1,10E+0	38,06	6,96E-2	1,56E-4	2,48E-6	0,97790	5,78E-4
TVSAR	0,85	39,07	79,2	2,92E+1	37,08	2,32E+0	2,25E-4	1,59E-4	0,97233	1,30E-2
TV	0	44,07	110,2	1,30E+0	42,07	1,11E-1	6,21E-5	1,59E-6	0,99137	2,85E-4
II	0	44,07	108,6	8,94E-1	42,15	7,51E-2	6,09E-5	1,06E-6	0,99151	2,38E-4
SAR	0	44,07	22,2	1,64E+0	31,26	5,08E-2	7,48E-4	8,74E-6	0,92786	5,59E-4
II SAR	0,85	44,07	102	1,41E+0	42,54	9,28E-2	5,57E-5	1,20E-6	0,99206	2,23E-4
TVSAR	0,85	44,07	104,8	8,37E-1	42,49	9,64E-2	5,64E-5	1,25E-6	0,99196	2,50E-4
TV	0	49,07	112,6	1,82E+0	46,64	9,19E-2	2,17E-5	4,58E-7	0,99756	6,07E-5
II	0	49,07	113,6	2,30E+0	46,80	8,43E-2	2,09E-5	4,05E-7	0,99761	9,55E-5
SAR	0	49,07	21,6	1,34E+0	31,24	4,30E-2	7,51E-4	7,39E-6	0,92770	4,56E-4
II SAR	0,85	49,07	106,2	4,47E-1	47,10	7,58E-2	1,95E-5	3,39E-7	0,99772	7,74E-5
TVSAR	0,85	49,07	107,6	1,34E+0	47,03	1,01E-1	1,98E-5	4,66E-7	0,99770	6,65E-5
TV	0	54,07	113,2	2,17E+0	48,32	2,54E-1	1,48E-5	8,77E-7	0,99865	7,09E-5
II	0	54,07	113,8	1,79E+0	48,45	1,65E-1	1,43E-5	5,38E-7	0,99867	4,89E-5
SAR	0	54,07	21,6	1,34E+0	31,24	4,19E-2	7,51E-4	7,20E-6	0,92773	4,47E-4
II SAR	0,85	54,07	107,2	1,30E+0	48,77	1,34E-1	1,33E-5	4,11E-7	0,99874	4,21E-5
TVSAR	0,85	54,07	107,6	1,52E+0	48,68	7,14E-2	1,35E-5	2,23E-7	0,99873	1,65E-5
TV	0	64,07	113,8	1,48E+0	48,57	4,60E-2	1,39E-5	1,47E-7	0,99878	1,29E-5
II	0	64,07	112,8	1,30E+0	48,51	1,32E-1	1,41E-5	4,32E-7	0,99875	3,71E-5
SAR	0	64,07	21,6	1,34E+0	31,25	4,08E-2	7,50E-4	7,00E-6	0,92776	4,32E-4
II SAR	0,85	64,07	106,4	1,95E+0	49,00	1,15E-1	1,26E-5	3,28E-7	0,99886	3,10E-5
TVSAR	0,85	64,07	107,8	8,37E-1	48,88	1,25E-1	1,29E-5	3,72E-7	0,99884	3,35E-5

Tabela A.22 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original *cra5302*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	3	0,00E+0	29,24	5,96E-2	1,19E-3	1,64E-5	0,86964	1,08E-3
l1	0	25,07	3	0,00E+0	29,15	5,15E-2	1,22E-3	1,44E-5	0,86921	1,01E-3
SAR	0	25,07	3	0,00E+0	28,87	3,09E-2	1,30E-3	9,19E-6	0,86447	1,07E-3
l1SAR	0,85	25,07	3	0,00E+0	29,18	4,31E-2	1,21E-3	1,20E-5	0,86941	1,00E-3
TVSAR	0,85	25,07	3	0,00E+0	29,21	4,52E-2	1,20E-3	1,25E-5	0,86925	1,02E-3
TV	0	29,07	5,2	4,47E-1	30,79	2,63E-2	8,34E-4	5,04E-6	0,90919	3,45E-4
l1	0	29,07	5	0,00E+0	30,70	2,89E-2	8,52E-4	5,65E-6	0,90904	4,63E-4
SAR	0	29,07	12	0,00E+0	29,79	1,39E-2	1,05E-3	3,35E-6	0,89564	3,88E-4
l1SAR	0,85	29,07	14	0,00E+0	30,77	2,02E-2	8,37E-4	3,90E-6	0,90949	4,42E-4
TVSAR	0,85	29,07	14	0,00E+0	30,78	1,97E-2	8,35E-4	3,79E-6	0,90939	4,40E-4
TV	0	34,07	21,6	5,13E+0	32,17	4,09E-2	6,07E-4	5,72E-6	0,93937	7,52E-4
l1	0	34,07	20,4	1,14E+0	32,03	4,50E-2	6,27E-4	6,53E-6	0,93855	4,53E-4
SAR	0	34,07	1	0,00E+0	31,47	4,44E-2	7,13E-4	7,29E-6	0,92879	2,00E-4
l1SAR	0,85	34,07	22,6	1,34E+0	32,27	5,70E-2	5,93E-4	7,75E-6	0,93909	2,92E-4
TVSAR	0,85	34,07	22	0,00E+0	32,27	2,27E-2	5,92E-4	3,10E-6	0,93899	1,79E-4
TV	0	39,07	89,4	2,79E+0	37,57	8,84E-2	1,75E-4	3,54E-6	0,97631	6,55E-4
l1	0	39,07	91	1,58E+0	37,45	9,38E-2	1,80E-4	3,83E-6	0,97601	6,23E-4
SAR	0	39,07	1	0,00E+0	32,39	8,84E-3	5,76E-4	1,17E-6	0,94873	3,24E-4
l1SAR	0,85	39,07	86,6	1,34E+0	38,06	6,96E-2	1,56E-4	2,48E-6	0,97790	5,75E-4
TVSAR	0,85	39,07	78,4	2,87E+1	37,08	2,32E+0	2,25E-4	1,59E-6	0,97234	1,30E-2
TV	0	44,07	110,2	1,30E+0	42,07	1,11E-1	6,21E-5	1,59E-6	0,99137	2,85E-4
l1	0	44,07	108,6	8,94E-1	42,15	7,51E-2	6,09E-5	1,06E-6	0,99151	2,38E-4
SAR	0	44,07	1	0,00E+0	32,50	7,95E-3	5,62E-4	1,03E-6	0,95076	1,10E-4
l1SAR	0,85	44,07	102	1,41E+0	42,54	9,28E-2	5,57E-5	1,20E-6	0,99206	2,23E-4
TVSAR	0,85	44,07	104,8	8,37E-1	42,49	9,64E-2	5,64E-5	1,25E-6	0,99196	2,50E-4
TV	0	49,07	112,6	1,82E+0	46,64	9,19E-2	2,17E-5	4,58E-7	0,99756	6,07E-5
l1	0	49,07	113,6	2,30E+0	46,80	8,43E-2	2,09E-5	4,05E-7	0,99761	9,55E-5
SAR	0	49,07	1	0,00E+0	32,49	1,68E-2	5,63E-4	2,19E-6	0,95088	1,33E-4
l1SAR	0,85	49,07	106,2	4,47E-1	47,10	7,58E-2	1,95E-5	3,39E-7	0,99772	7,74E-5
TVSAR	0,85	49,07	107,6	1,34E+0	47,03	1,01E-1	1,98E-5	4,66E-7	0,99770	6,65E-5
TV	0	54,07	113,2	2,17E+0	48,32	2,54E-1	1,48E-5	8,77E-7	0,99865	7,09E-5
l1	0	54,07	113,8	1,79E+0	48,45	1,65E-1	1,43E-5	5,38E-7	0,99867	4,89E-5
SAR	0	54,07	1	0,00E+0	32,51	7,17E-3	5,62E-4	9,29E-7	0,95098	5,40E-5
l1SAR	0,85	54,07	107,2	1,30E+0	48,77	1,34E-1	1,33E-5	4,11E-7	0,99874	4,21E-5
TVSAR	0,85	54,07	107,6	1,52E+0	48,68	7,14E-2	1,35E-5	2,23E-7	0,99873	1,65E-5
TV	0	64,07	113,8	1,48E+0	48,57	4,60E-2	1,39E-5	1,47E-7	0,99878	1,29E-5
l1	0	64,07	112,8	1,30E+0	48,51	1,32E-1	1,41E-5	4,32E-7	0,99875	3,71E-5
SAR	0	64,07	1	0,00E+0	32,51	1,31E-3	5,61E-4	1,69E-7	0,95100	1,49E-5
l1SAR	0,85	64,07	106,4	1,95E+0	49,00	1,15E-1	1,26E-5	3,28E-7	0,99886	3,10E-5
TVSAR	0,85	64,07	107,8	8,37E-1	48,88	1,25E-1	1,29E-5	3,72E-7	0,99884	3,35E-5

Tabela A.23 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original *cra5302*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	3	0,00E+0	29,24	5,96E-2	1,19E-3	1,64E-5	0,86964	1,08E-3
II	0	25,07	3	0,00E+0	29,15	5,15E-2	1,22E-3	1,44E-5	0,86921	1,01E-3
SAR	0	25,07	4,8	4,47E-1	28,83	3,25E-2	1,31E-3	9,77E-6	0,86481	1,07E-3
II SAR	0,85	25,07	3	0,00E+0	29,18	4,31E-2	1,21E-3	1,20E-5	0,86941	1,00E-3
TV SAR	0,85	25,07	3	0,00E+0	29,21	4,52E-2	1,20E-3	1,25E-5	0,86925	1,02E-3
<hr/>										
TV	0	29,07	6,8	4,47E-1	30,77	2,98E-2	8,37E-4	5,74E-6	0,90946	4,17E-4
II	0	29,07	6	0,00E+0	30,69	2,97E-2	8,53E-4	5,83E-6	0,90919	4,30E-4
SAR	0	29,07	12	0,00E+0	29,79	1,39E-2	1,05E-3	3,35E-6	0,89564	3,88E-4
II SAR	0,85	29,07	13,2	1,10E+0	30,77	2,03E-2	8,37E-4	3,92E-6	0,90949	4,41E-4
TV SAR	0,85	29,07	14	0,00E+0	30,78	1,97E-2	8,35E-4	3,79E-6	0,90939	4,40E-4
<hr/>										
TV	0	34,07	28	1,87E+0	32,14	5,68E-2	6,11E-4	8,01E-6	0,93969	3,58E-4
II	0	34,07	26,2	2,77E+0	32,01	3,75E-2	6,30E-4	5,45E-6	0,93864	4,94E-4
SAR	0	34,07	1	0,00E+0	31,47	4,44E-2	7,13E-4	7,29E-6	0,92879	2,00E-4
II SAR	0,85	34,07	22,6	1,34E+0	32,27	5,70E-2	5,93E-4	7,75E-6	0,93909	2,92E-4
TV SAR	0,85	34,07	22	0,00E+0	32,27	2,27E-2	5,92E-4	3,10E-6	0,93899	1,79E-4
<hr/>										
TV	0	39,07	67,8	1,10E+0	37,48	9,82E-2	1,79E-4	4,02E-6	0,97685	6,21E-4
II	0	39,07	68,8	1,79E+0	37,33	1,05E-1	1,85E-4	4,41E-6	0,97628	6,58E-4
SAR	0	39,07	1	0,00E+0	32,39	8,84E-3	5,76E-4	1,17E-6	0,94873	3,24E-4
II SAR	0,85	39,07	76,2	2,17E+0	38,03	7,14E-2	1,57E-4	2,57E-6	0,97796	5,69E-4
TV SAR	0,85	39,07	68,8	2,34E+1	37,07	2,31E+0	2,26E-4	1,58E-4	0,97244	1,31E-2
<hr/>										
TV	0	44,07	99,8	9,39E+0	41,93	1,99E-1	6,42E-5	2,92E-6	0,99139	2,72E-4
II	0	44,07	101,4	4,62E+0	42,07	9,54E-2	6,21E-5	1,36E-6	0,99153	2,28E-4
SAR	0	44,07	1	0,00E+0	32,50	7,95E-3	5,62E-4	1,03E-6	0,95076	1,10E-4
II SAR	0,85	44,07	88,2	6,26E+0	42,37	1,45E-1	5,80E-5	1,92E-6	0,99211	2,08E-4
TV SAR	0,85	44,07	83,4	6,50E+0	42,19	1,93E-1	6,05E-5	2,64E-6	0,99208	2,08E-4
<hr/>										
TV	0	49,07	112,6	1,82E+0	46,64	9,19E-2	2,17E-5	4,58E-7	0,99756	6,07E-5
II	0	49,07	113,6	2,30E+0	46,80	8,43E-2	2,09E-5	4,05E-7	0,99761	9,55E-5
SAR	0	49,07	1	0,00E+0	32,49	1,68E-2	5,63E-4	2,19E-6	0,95088	1,33E-4
II SAR	0,85	49,07	106,2	4,47E-1	47,10	7,58E-2	1,95E-5	3,39E-7	0,99772	7,74E-5
TV SAR	0,85	49,07	107,6	1,34E+0	47,03	1,01E-1	1,98E-5	4,66E-7	0,99770	6,65E-5
<hr/>										
TV	0	54,07	113,2	2,17E+0	48,32	2,54E-1	1,48E-5	8,77E-7	0,99865	7,09E-5
II	0	54,07	113,8	1,79E+0	48,45	1,65E-1	1,43E-5	5,38E-7	0,99867	4,89E-5
SAR	0	54,07	1	0,00E+0	32,51	7,17E-3	5,62E-4	9,29E-7	0,95098	5,40E-5
II SAR	0,85	54,07	107,2	1,30E+0	48,77	1,34E-1	1,33E-5	4,11E-7	0,99874	4,21E-5
TV SAR	0,85	54,07	107,6	1,52E+0	48,68	7,14E-2	1,35E-5	2,23E-7	0,99873	1,65E-5
<hr/>										
TV	0	64,07	113,8	1,48E+0	48,57	4,60E-2	1,39E-5	1,47E-7	0,99878	1,29E-5
II	0	64,07	112,8	1,30E+0	48,51	1,32E-1	1,41E-5	4,32E-7	0,99875	3,71E-5
SAR	0	64,07	1	0,00E+0	32,51	1,31E-3	5,61E-4	1,69E-7	0,95100	1,49E-5
II SAR	0,85	64,07	106,4	1,95E+0	49,00	1,15E-1	1,26E-5	3,28E-7	0,99886	3,10E-5
TV SAR	0,85	64,07	107,8	8,37E-1	48,88	1,25E-1	1,29E-5	3,72E-7	0,99884	3,35E-5

Tabela A.24 – Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência SSIM, a partir da imagem HR original *cra5302*

Método SR	λ	SNR (dB)	Média		Desvio Padrão	SNR (dB)	Média		Desvio Padrão	SNR (dB)	Média		Desvio Padrão
TV	0	25,07	32,48	1,89E+0	34,07	83,94	5,78E+0	44,07	400,80	2,88E+1	54,07	415,96	4,75E+1
II	0	25,07	37,25	2,67E+0	34,07	86,49	6,17E+0	44,07	398,35	2,99E+1	54,07	417,19	3,45E+1
SAR	0	25,07	40,57	2,13E+0	34,07	55,04	4,03E+0	44,07	66,88	6,30E+0	54,07	65,60	4,48E+0
II SAR	0,85	25,07	30,20	1,61E+0	34,07	67,66	4,88E+0	44,07	365,65	3,05E+1	54,07	384,58	3,54E+1
TV SAR	0,85	25,07	27,50	2,23E+0	34,07	66,08	4,60E+0	44,07	375,39	3,11E+1	54,07	381,92	3,51E+1
<hr/>													
TV	0	29,07	50,00	3,72E+0	39,07	327,47	1,78E+1	49,07	407,92	2,54E+1	64,07	414,34	3,35E+1
II	0	29,07	52,80	4,06E+0	39,07	326,76	2,04E+1	49,07	413,75	3,00E+1	64,07	413,77	3,85E+1
SAR	0	29,07	38,34	3,20E+0	39,07	62,23	2,50E+0	49,07	65,63	5,41E+0	64,07	66,82	8,86E+0
II SAR	0,85	29,07	43,34	3,29E+0	39,07	300,30	1,53E+1	49,07	382,12	3,47E+1	64,07	384,03	3,34E+1
TV SAR	0,85	29,07	43,86	3,24E+0	39,07	272,00	1,10E+2	49,07	387,02	3,79E+1	64,07	372,20	2,04E+1

Tabela A.25 – Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original *crahouse*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	19	0,00E+0	24,17	8,44E-2	3,83E-3	7,50E-5	0,70835	4,00E-3
l1	0	25,07	20	0,00E+0	23,95	8,41E-2	4,02E-3	7,84E-5	0,70050	4,08E-3
SAR	0	25,07	35,8	4,47E-1	27,16	3,51E-2	1,92E-3	1,56E-5	0,82510	3,21E-3
l1SAR	0,85	25,07	20	0,00E+0	24,79	8,66E-2	3,32E-3	6,66E-5	0,72938	4,31E-3
TVSAR	0,85	25,07	19	0,00E+0	24,89	8,54E-2	3,25E-3	6,43E-5	0,73343	4,21E-3
TV	0	29,07	14	0,00E+0	28,78	9,74E-2	1,32E-3	2,98E-5	0,86592	1,98E-3
l1	0	29,07	16,6	5,48E-1	28,78	9,83E-2	1,33E-3	3,02E-5	0,86337	1,86E-3
SAR	0	29,07	19	0,00E+0	29,52	3,20E-2	1,12E-3	8,18E-6	0,89892	1,53E-3
l1SAR	0,85	29,07	13,6	5,48E-1	29,45	8,09E-2	1,14E-3	2,12E-5	0,87699	1,82E-3
TVSAR	0,85	29,07	12	0,00E+0	29,37	8,09E-2	1,16E-3	2,16E-5	0,87751	1,85E-3
TV	0	34,07	23,2	4,47E-1	32,82	1,16E-1	5,23E-4	1,41E-5	0,94710	7,24E-4
l1	0	34,07	26,4	1,52E+0	33,13	1,23E-1	4,87E-4	1,39E-5	0,94807	6,81E-4
SAR	0	34,07	15	0,00E+0	31,79	1,60E-2	6,62E-4	2,44E-6	0,94568	3,75E-4
l1SAR	0,85	34,07	18,6	5,48E-1	33,54	6,19E-2	4,43E-4	6,32E-6	0,95147	5,20E-4
TVSAR	0,85	34,07	19	0,00E+0	33,34	5,96E-2	4,63E-4	6,37E-6	0,95060	5,71E-4
TV	0	39,07	38	0,00E+0	36,12	7,06E-2	2,44E-4	4,01E-6	0,97594	2,59E-4
l1	0	39,07	40,8	1,64E+0	36,65	5,69E-2	2,16E-4	2,84E-6	0,97724	2,72E-4
SAR	0	39,07	31,4	5,48E-1	34,49	7,44E-3	3,56E-4	6,09E-7	0,97055	1,63E-4
l1SAR	0,85	39,07	33,8	4,47E-1	37,33	6,59E-2	1,85E-4	2,82E-6	0,97914	2,55E-4
TVSAR	0,85	39,07	35	0,00E+0	37,00	6,20E-2	2,00E-4	2,87E-6	0,97832	2,24E-4
TV	0	44,07	72,4	6,43E+0	38,84	1,07E-1	1,31E-4	3,23E-6	0,98652	1,58E-4
l1	0	44,07	71,4	3,36E+0	39,76	1,02E-1	1,06E-4	2,48E-6	0,98803	1,82E-4
SAR	0	44,07	83,2	2,59E+0	39,77	3,14E-2	1,05E-4	7,62E-7	0,98802	1,62E-4
l1SAR	0,85	44,07	66	2,35E+0	40,85	4,29E-2	8,23E-5	8,13E-7	0,98971	1,82E-4
TVSAR	0,85	44,07	68,8	1,30E+0	40,32	3,77E-2	9,29E-5	8,07E-7	0,98890	1,45E-4
TV	0	49,07	101,2	2,59E+0	42,22	1,18E-1	6,00E-5	1,65E-6	0,99277	1,26E-4
l1	0	49,07	97,4	2,07E+0	42,99	9,09E-2	5,03E-5	1,07E-6	0,99362	7,31E-5
SAR	0	49,07	85,4	5,48E-1	44,60	8,34E-2	3,47E-5	6,68E-7	0,99504	7,35E-5
l1SAR	0,85	49,07	89,6	2,79E+0	43,63	9,61E-2	4,33E-5	9,73E-7	0,99420	6,12E-5
TVSAR	0,85	49,07	91,8	1,10E+0	43,07	1,06E-1	4,93E-5	1,21E-6	0,99361	9,71E-5
TV	0	54,07	112,8	2,49E+0	46,39	1,22E-1	2,30E-5	6,47E-7	0,99780	4,86E-5
l1	0	54,07	107	2,00E+0	46,94	1,20E-1	2,02E-5	5,55E-7	0,99799	3,40E-5
SAR	0	54,07	93,2	8,37E-1	47,74	6,04E-2	1,68E-5	2,34E-7	0,99814	6,27E-5
l1SAR	0,85	54,07	100,2	2,17E+0	47,17	1,27E-1	1,92E-5	5,63E-7	0,99806	5,07E-5
TVSAR	0,85	54,07	101,6	1,67E+0	46,68	6,49E-2	2,15E-5	3,22E-7	0,99790	4,87E-5
TV	0	64,07	108,2	2,59E+0	48,17	1,19E-1	1,53E-5	4,18E-7	0,99907	2,84E-5
l1	0	64,07	107	1,22E+0	48,85	4,33E-2	1,30E-5	1,30E-7	0,99919	4,35E-5
SAR	0	64,07	97,4	1,14E+0	49,38	4,84E-2	1,15E-5	1,28E-7	0,99925	1,24E-5
l1SAR	0,85	64,07	101	1,41E+0	48,91	1,15E-1	1,29E-5	3,40E-7	0,99920	2,41E-5
TVSAR	0,85	64,07	103,4	1,82E+0	48,44	6,74E-2	1,43E-5	2,24E-7	0,99912	1,28E-5

Tabela A.26 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original *crahouse*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	2	0,00E+0	27,74	3,14E-2	1,68E-3	1,22E-5	0,84615	2,11E-3
II	0	25,07	2	0,00E+0	28,03	2,97E-2	1,58E-3	1,08E-5	0,85305	1,91E-3
SAR	0	25,07	35,8	4,47E-1	27,16	3,51E-2	1,92E-3	1,56E-5	0,82510	3,21E-3
II SAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	27,88	2,78E-2	1,63E-3	1,05E-5	0,84985	2,02E-3
TV SAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	27,67	2,39E-2	1,71E-3	9,43E-6	0,84247	2,25E-3
TV	0	29,07	2	0,00E+0	30,23	4,44E-2	9,49E-4	9,66E-6	0,90672	1,24E-3
II	0	29,07	2	0,00E+0	30,38	5,12E-2	9,17E-4	1,08E-5	0,90770	1,12E-3
SAR	0	29,07	7,2	4,47E-1	29,55	3,83E-2	1,11E-3	9,73E-6	0,89637	1,71E-3
II SAR	0,85	29,07	3	0,00E+0	30,18	6,45E-2	9,60E-4	1,42E-5	0,89751	1,59E-3
TV SAR	0,85	29,07	2	0,00E+0	30,18	4,21E-2	9,59E-4	9,25E-6	0,90627	1,33E-3
TV	0	34,07	4	0,00E+0	33,33	5,52E-2	4,65E-4	5,92E-6	0,95130	5,46E-4
II	0	34,07	4	0,00E+0	33,64	6,15E-2	4,33E-4	6,14E-6	0,95248	5,58E-4
SAR	0	34,07	15	0,00E+0	31,79	1,60E-2	6,62E-4	2,44E-6	0,94568	3,75E-4
II SAR	0,85	34,07	6,8	4,47E-1	33,56	5,15E-2	4,40E-4	5,22E-6	0,95224	5,30E-4
TV SAR	0,85	34,07	7,4	8,94E-1	33,36	5,13E-2	4,61E-4	5,46E-6	0,95129	5,27E-4
TV	0	39,07	11	0,00E+0	36,78	8,04E-2	2,10E-4	3,92E-6	0,97854	1,36E-4
II	0	39,07	12,2	1,79E+0	37,21	1,59E-1	1,90E-4	7,02E-6	0,97968	3,15E-4
SAR	0	39,07	1	0,00E+0	35,47	2,88E-2	2,84E-4	1,88E-6	0,96348	4,85E-4
II SAR	0,85	39,07	15,6	5,48E-1	37,39	5,87E-2	1,82E-4	2,48E-6	0,97979	1,81E-4
TV SAR	0,85	39,07	16,8	4,47E-1	37,05	5,56E-2	1,97E-4	2,54E-6	0,97892	1,89E-4
TV	0	44,07	17	0,00E+0	39,70	5,19E-2	1,07E-4	1,28E-6	0,99001	9,92E-5
II	0	44,07	23,6	1,95E+0	40,32	5,24E-2	9,29E-5	1,12E-6	0,99079	1,22E-4
SAR	0	44,07	83,2	2,59E+0	39,77	3,14E-2	1,05E-4	7,62E-7	0,98802	1,62E-4
II SAR	0,85	44,07	26,8	1,30E+0	41,03	3,98E-2	7,90E-5	7,23E-7	0,99121	1,23E-4
TV SAR	0,85	44,07	26	0,00E+0	40,55	3,57E-2	8,81E-5	7,24E-7	0,99084	5,61E-5
TV	0	49,07	90	3,32E+0	42,26	1,20E-1	5,95E-5	1,66E-6	0,99286	1,07E-4
II	0	49,07	36,6	1,82E+0	43,23	1,37E-1	4,76E-5	1,49E-6	0,99560	1,76E-4
SAR	0	49,07	62,8	1,79E+0	44,67	7,12E-2	3,41E-5	5,61E-7	0,99533	7,15E-5
II SAR	0,85	49,07	35	7,07E-1	44,12	1,09E-1	3,87E-5	9,72E-7	0,99614	1,90E-5
TV SAR	0,85	49,07	34,8	4,47E-1	43,46	1,22E-1	4,51E-5	1,28E-6	0,99586	5,67E-5
TV	0	54,07	98,8	3,77E+0	46,42	1,17E-1	2,28E-5	6,17E-7	0,99784	4,91E-5
II	0	54,07	87,2	1,92E+0	47,04	1,13E-1	1,98E-5	5,13E-7	0,99805	3,61E-5
SAR	0	54,07	68,2	1,92E+0	47,97	7,13E-2	1,60E-5	2,63E-7	0,99832	3,38E-5
II SAR	0,85	54,07	81,2	3,63E+0	47,30	1,11E-1	1,86E-5	4,81E-7	0,99815	4,01E-5
TV SAR	0,85	54,07	85	2,45E+0	46,78	7,89E-2	2,10E-5	3,84E-7	0,99798	4,66E-5
TV	0	64,07	107,8	3,27E+0	48,17	1,19E-1	1,53E-5	4,18E-7	0,99907	2,83E-5
II	0	64,07	96,4	2,30E+0	48,86	4,32E-2	1,30E-5	1,29E-7	0,99919	4,31E-6
SAR	0	64,07	76,2	3,27E+0	49,48	3,15E-2	1,13E-5	8,20E-8	0,99924	9,51E-6
II SAR	0,85	64,07	85	2,65E+0	48,97	1,04E-1	1,27E-5	3,02E-7	0,99920	2,20E-5
TV SAR	0,85	64,07	92,6	2,30E+0	48,46	6,32E-2	1,43E-5	2,09E-7	0,99912	1,25E-5

Tabela A.27 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original *crahouse*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	2	0,00E+0	27,74	3,14E-2	1,68E-3	1,22E-5	0,84615	2,11E-3
l1	0	25,07	2	0,00E+0	28,03	2,97E-2	1,58E-3	1,08E-5	0,85305	1,91E-3
SAR	0	25,07	35,8	4,47E-1	27,16	3,51E-2	1,92E-3	1,56E-5	0,82510	3,21E-3
l1SAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	27,88	2,78E-2	1,63E-3	1,05E-5	0,84985	2,02E-3
TVSAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	27,67	2,39E-2	1,71E-3	9,43E-6	0,84247	2,25E-3
TV	0	29,07	2	0,00E+0	30,23	4,44E-2	9,49E-4	9,66E-6	0,90672	1,24E-3
l1	0	29,07	2	0,00E+0	30,38	5,12E-2	9,17E-4	1,08E-5	0,90770	1,12E-3
SAR	0	29,07	19	0,00E+0	29,52	3,20E-2	1,12E-3	8,18E-6	0,89892	1,53E-3
l1SAR	0,85	29,07	2	0,00E+0	30,14	5,69E-2	9,69E-4	1,27E-5	0,90643	1,20E-3
TVSAR	0,85	29,07	2	0,00E+0	30,18	4,21E-2	9,59E-4	9,25E-6	0,90627	1,33E-3
TV	0	34,07	4	0,00E+0	33,33	5,52E-2	4,65E-4	5,92E-6	0,95130	5,46E-4
l1	0	34,07	4	0,00E+0	33,64	6,15E-2	4,33E-4	6,14E-6	0,95248	5,58E-4
SAR	0	34,07	15	0,00E+0	31,79	1,60E-2	6,62E-4	2,44E-6	0,94568	3,75E-4
l1SAR	0,85	34,07	5	0,00E+0	33,54	4,37E-2	4,43E-4	4,46E-6	0,95257	4,94E-4
TVSAR	0,85	34,07	5	0,00E+0	33,33	4,34E-2	4,65E-4	4,66E-6	0,95160	5,20E-4
TV	0	39,07	12	0,00E+0	36,77	8,20E-2	2,10E-4	4,01E-6	0,97864	1,41E-4
l1	0	39,07	12,2	1,30E+0	37,20	1,60E-1	1,90E-4	7,05E-6	0,97968	3,09E-4
SAR	0	39,07	31,4	5,48E-1	34,49	7,44E-3	3,56E-4	6,09E-7	0,97055	1,63E-4
l1SAR	0,85	39,07	13	0,00E+0	37,35	5,30E-2	1,84E-4	2,25E-6	0,97991	1,73E-4
TVSAR	0,85	39,07	14,2	4,47E-1	37,02	5,16E-2	1,98E-4	2,37E-6	0,97902	1,55E-4
TV	0	44,07	19,8	4,47E-1	39,64	6,70E-2	1,09E-4	1,67E-6	0,99026	1,05E-4
l1	0	44,07	21,8	4,47E-1	40,31	4,74E-2	9,30E-5	1,01E-6	0,99084	1,06E-4
SAR	0	44,07	83,2	2,59E+0	39,77	3,14E-2	1,05E-4	7,62E-7	0,98802	1,62E-4
l1SAR	0,85	44,07	22,4	8,94E-1	40,97	2,35E-2	8,00E-5	4,33E-7	0,99140	9,97E-5
TVSAR	0,85	44,07	22	0,00E+0	40,52	3,49E-2	8,87E-5	7,13E-7	0,99098	6,17E-5
TV	0	49,07	31,6	5,48E-1	41,92	9,77E-2	6,43E-5	1,46E-6	0,99509	4,26E-5
l1	0	49,07	33	7,07E-1	43,18	1,47E-1	4,81E-5	1,62E-6	0,99571	8,66E-5
SAR	0	49,07	52	0,00E+0	44,48	4,95E-2	3,56E-5	4,06E-7	0,99557	2,33E-5
l1SAR	0,85	49,07	32,4	5,48E-1	44,08	1,06E-1	3,91E-5	9,57E-7	0,99619	3,44E-5
TVSAR	0,85	49,07	32,6	5,48E-1	43,43	1,19E-1	4,54E-5	1,26E-6	0,99590	5,73E-5
TV	0	54,07	94,6	3,78E+0	46,38	1,12E-1	2,30E-5	5,91E-7	0,99786	4,99E-5
l1	0	54,07	78	2,92E+0	46,91	1,50E-1	2,04E-5	7,04E-7	0,99808	2,76E-5
SAR	0	54,07	62	1,41E+0	47,86	5,88E-2	1,64E-5	2,22E-7	0,99835	3,14E-5
l1SAR	0,85	54,07	70,2	1,64E+0	47,14	1,09E-1	1,93E-5	4,87E-7	0,99818	3,56E-5
TVSAR	0,85	54,07	76,4	3,05E+0	46,63	1,42E-1	2,17E-5	7,11E-7	0,99800	4,98E-5
TV	0	64,07	107,4	4,04E+0	48,17	1,19E-1	1,53E-5	4,18E-7	0,99907	2,83E-5
l1	0	64,07	102,6	2,41E+0	48,86	4,47E-2	1,30E-5	1,34E-7	0,99919	4,37E-6
SAR	0	64,07	89,4	1,09E+1	49,41	2,65E-2	1,14E-5	7,00E-8	0,99925	1,09E-5
l1SAR	0,85	64,07	87,2	3,42E+0	48,96	1,02E-1	1,27E-5	2,98E-7	0,99920	2,22E-5
TVSAR	0,85	64,07	94,8	2,68E+0	48,45	6,29E-2	1,43E-5	2,08E-7	0,99912	1,24E-5

Tabela A.28 – Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência PSNR, a partir da imagem HR original *crahouse*

Método SR	λ	SNR (dB)	Média		Desvio Padrão	SNR (dB)	Média		Desvio Padrão	SNR (dB)	Média		Desvio Padrão
			Média	Desvio Padrão			Média	Desvio Padrão			Média	Desvio Padrão	
TV	0	25,07	56,98	2,75E+0	34,07	68,12	2,29E+0	44,07	232,60	1,32E+1	54,07	369,95	1,02E+1
l1	0	25,07	59,02	2,52E+0	34,07	76,90	2,50E+0	44,07	235,30	8,66E+0	54,07	355,64	1,43E+1
SAR	0	25,07	95,87	4,77E+0	34,07	44,85	1,83E+0	44,07	256,61	1,11E+1	54,07	298,22	7,42E+0
l1SAR	0,85	25,07	57,50	2,44E+0	34,07	54,57	2,66E+0	44,07	209,02	1,02E+1	54,07	323,53	1,04E+1
TVSAR	0,85	25,07	54,99	1,97E+0	34,07	55,34	2,29E+0	44,07	217,06	3,86E+0	54,07	326,98	1,50E+1
TV	0	29,07	42,85	1,91E+0	39,07	108,66	4,11E+0	49,07	337,31	1,67E+1	64,07	353,79	1,74E+1
l1	0	29,07	50,22	2,29E+0	39,07	120,22	1,22E+1	49,07	326,55	7,33E+0	64,07	348,08	1,78E+1
SAR	0	29,07	54,16	2,35E+0	39,07	88,73	3,12E+0	49,07	279,73	6,47E+0	64,07	304,17	1,34E+1
l1SAR	0,85	29,07	40,74	2,51E+0	39,07	95,24	4,80E+0	49,07	295,95	9,58E+0	64,07	321,57	1,89E+1
TVSAR	0,85	29,07	36,60	1,58E+0	39,07	98,36	4,33E+0	49,07	304,05	7,24E+0	64,07	330,03	1,53E+1

Tabela A.29 – Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original *crahouse*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	13	0,00E+0	24,15	1,12E-1	3,85E-3	9,98E-5	0,70899	4,88E-3
II	0	25,07	14	0,00E+0	23,94	1,15E-1	4,04E-3	1,07E-4	0,70120	4,96E-3
SAR	0	25,07	24	0,00E+0	27,17	6,90E-2	1,92E-3	3,05E-5	0,82563	3,61E-3
II SAR	0,85	25,07	15	0,00E+0	24,77	1,22E-1	3,34E-3	9,46E-5	0,72983	5,12E-3
TV SAR	0,85	25,07	14	0,00E+0	24,86	1,18E-1	3,27E-3	8,90E-5	0,73381	5,02E-3
TV	0	29,07	9	0,00E+0	28,81	3,91E-2	1,31E-3	1,18E-5	0,86745	2,97E-3
II	0	29,07	10,4	5,48E-1	28,82	4,34E-2	1,31E-3	1,31E-5	0,86502	3,04E-3
SAR	0	29,07	14,2	4,47E-1	29,55	1,87E-2	1,11E-3	4,77E-6	0,90027	1,78E-3
II SAR	0,85	29,07	10	0,00E+0	29,49	4,57E-2	1,12E-3	1,18E-5	0,87858	2,79E-3
TV SAR	0,85	29,07	8,2	4,47E-1	29,42	4,34E-2	1,14E-3	1,14E-5	0,87907	2,78E-3
TV	0	34,07	15,8	4,47E-1	32,89	5,73E-2	5,14E-4	6,83E-6	0,94729	1,03E-3
II	0	34,07	16,4	8,94E-1	33,16	1,60E-1	4,84E-4	1,82E-5	0,94814	1,32E-3
SAR	0	34,07	12	0,00E+0	31,79	1,51E-2	6,62E-4	2,30E-6	0,94562	4,25E-4
II SAR	0,85	34,07	13	0,00E+0	33,57	5,47E-2	4,40E-4	5,56E-6	0,95154	8,30E-4
TV SAR	0,85	34,07	13	0,00E+0	33,37	5,38E-2	4,60E-4	5,72E-6	0,95065	8,33E-4
TV	0	39,07	27	0,00E+0	36,27	8,13E-2	2,36E-4	4,41E-6	0,97635	4,67E-4
II	0	39,07	28	1,41E+0	36,83	9,42E-2	2,08E-4	4,52E-6	0,97760	3,87E-4
SAR	0	39,07	21	0,00E+0	34,45	1,92E-2	3,59E-4	1,59E-6	0,97031	2,84E-4
II SAR	0,85	39,07	24	0,00E+0	37,47	4,92E-2	1,79E-4	2,04E-6	0,97942	3,30E-4
TV SAR	0,85	39,07	25	0,00E+0	37,12	4,09E-2	1,94E-4	1,83E-6	0,97860	3,47E-4
TV	0	44,07	61,4	3,85E+0	38,91	1,71E-1	1,29E-4	5,18E-6	0,98677	5,07E-4
II	0	44,07	55,8	1,10E+0	39,87	1,01E-1	1,03E-4	2,41E-6	0,98842	3,54E-4
SAR	0	44,07	56,2	1,64E+0	39,57	3,89E-2	1,10E-4	9,93E-7	0,98786	1,45E-4
II SAR	0,85	44,07	50,6	5,48E-1	40,91	4,99E-2	8,11E-5	9,34E-7	0,99003	2,80E-4
TV SAR	0,85	44,07	55,8	1,92E+0	40,36	9,50E-2	9,20E-5	2,04E-6	0,98915	3,07E-4
TV	0	49,07	86,6	1,82E+0	42,31	7,48E-2	5,87E-5	1,01E-6	0,99294	1,06E-4
II	0	49,07	79,2	1,10E+0	43,08	6,90E-2	4,92E-5	7,78E-7	0,99380	9,12E-5
SAR	0	49,07	73,6	5,48E-1	44,69	2,58E-2	3,39E-5	2,02E-7	0,99519	4,68E-5
II SAR	0,85	49,07	72,8	1,10E+0	43,74	3,67E-2	4,23E-5	3,58E-7	0,99438	6,34E-5
TV SAR	0,85	49,07	78,8	1,30E+0	43,17	4,77E-2	4,82E-5	5,29E-7	0,99378	5,35E-5
TV	0	54,07	90	2,35E+0	46,27	1,65E-1	2,36E-5	9,05E-7	0,99780	8,24E-5
II	0	54,07	82,8	1,64E+0	46,96	8,68E-2	2,01E-5	4,03E-7	0,99802	6,29E-5
SAR	0	54,07	75,6	8,94E-1	47,87	1,30E-1	1,64E-5	4,95E-7	0,99821	6,76E-5
II SAR	0,85	54,07	78,8	2,28E+0	47,25	1,31E-1	1,89E-5	5,71E-7	0,99811	6,52E-5
TV SAR	0,85	54,07	84,8	1,64E+0	46,71	1,10E-1	2,13E-5	5,43E-7	0,99793	6,07E-5
TV	0	64,07	89,2	1,30E+0	47,89	1,07E-1	1,63E-5	4,01E-7	0,99901	2,43E-5
II	0	64,07	81	3,39E+0	48,50	1,26E-1	1,41E-5	4,08E-7	0,99911	2,68E-5
SAR	0	64,07	75,4	8,94E-1	49,48	6,73E-2	1,13E-5	1,76E-7	0,99924	1,54E-5
II SAR	0,85	64,07	77	7,07E-1	48,77	4,04E-2	1,33E-5	1,24E-7	0,99916	6,93E-6
TV SAR	0,85	64,07	82	2,55E+0	48,23	8,97E-2	1,50E-5	3,10E-7	0,99906	1,88E-5

Tabela A.30 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original *crahouse*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	2	0,00E+0	27,74	3,98E-2	1,68E-3	1,55E-5	0,84672	1,53E-3
l1	0	25,07	2	0,00E+0	28,05	4,83E-2	1,57E-3	1,74E-5	0,85393	1,59E-3
SAR	0	25,07	24	0,00E+0	27,17	6,90E-2	1,92E-3	3,05E-5	0,82563	3,61E-3
l1SAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	27,92	4,82E-2	1,62E-3	1,80E-5	0,85090	1,76E-3
TVSAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	27,68	4,30E-2	1,71E-3	1,69E-5	0,84310	1,87E-3
TV	0	29,07	2	0,00E+0	30,24	3,45E-2	9,46E-4	7,51E-6	0,90779	1,43E-3
l1	0	29,07	2	0,00E+0	30,41	7,94E-2	9,10E-4	1,66E-5	0,90888	1,58E-3
SAR	0	29,07	7	0,00E+0	29,58	1,98E-2	1,10E-3	5,03E-6	0,89753	1,96E-3
l1SAR	0,85	29,07	2,8	4,47E-1	30,23	4,08E-2	9,49E-4	8,89E-6	0,90062	5,41E-3
TVSAR	0,85	29,07	2	0,00E+0	30,20	3,03E-2	9,55E-4	6,66E-6	0,90743	1,54E-3
TV	0	34,07	4	0,00E+0	33,36	2,90E-2	4,62E-4	3,09E-6	0,95125	6,25E-4
l1	0	34,07	4	0,00E+0	33,62	1,32E-1	4,35E-4	1,35E-5	0,95224	1,01E-3
SAR	0	34,07	12	0,00E+0	31,79	1,51E-1	6,62E-4	2,30E-6	0,94562	4,25E-4
l1SAR	0,85	34,07	7	0,00E+0	33,59	4,85E-2	4,38E-4	4,90E-6	0,95218	7,44E-4
TVSAR	0,85	34,07	7,6	5,48E-1	33,38	4,74E-2	4,59E-4	5,02E-6	0,95121	6,60E-4
TV	0	39,07	11,6	5,48E-1	36,87	2,91E-2	2,06E-4	1,38E-6	0,97871	3,39E-4
l1	0	39,07	12,6	2,19E+0	37,28	2,26E-1	1,87E-4	9,86E-6	0,97969	6,84E-4
SAR	0	39,07	1	0,00E+0	35,56	6,41E-2	2,78E-4	4,11E-6	0,96383	5,53E-4
l1SAR	0,85	39,07	16,2	4,47E-1	37,50	4,57E-2	1,78E-4	1,88E-6	0,97988	3,00E-4
TVSAR	0,85	39,07	17,4	5,48E-1	37,15	3,52E-2	1,93E-4	1,56E-6	0,97900	3,08E-4
TV	0	44,07	17	0,00E+0	39,72	5,40E-2	1,07E-4	1,32E-6	0,99000	1,37E-4
l1	0	44,07	22,6	2,30E+0	40,34	5,63E-2	9,26E-5	1,20E-6	0,99081	1,22E-4
SAR	0	44,07	56,2	1,64E+0	39,57	3,89E-2	1,10E-4	9,93E-7	0,98786	1,45E-4
l1SAR	0,85	44,07	27	3,00E+0	41,05	3,20E-2	7,85E-5	5,80E-7	0,99127	1,85E-4
TVSAR	0,85	44,07	25	1,73E+0	40,57	5,03E-2	8,77E-5	1,01E-6	0,99093	9,35E-5
TV	0	49,07	86,6	1,82E+0	42,31	7,48E-2	5,87E-5	1,01E-6	0,99294	1,06E-4
l1	0	49,07	37	2,00E+0	43,24	8,05E-2	4,74E-5	8,77E-7	0,99560	1,44E-4
SAR	0	49,07	62,4	5,48E-1	44,72	2,09E-2	3,37E-5	1,62E-7	0,99539	6,42E-5
l1SAR	0,85	49,07	34,8	4,47E-1	44,15	2,54E-2	3,85E-5	2,25E-7	0,99614	8,20E-5
TVSAR	0,85	49,07	34,8	1,10E+0	43,49	2,96E-2	4,48E-5	3,06E-7	0,99585	1,06E-4
TV	0	54,07	90	2,35E+0	46,27	1,65E-1	2,36E-5	9,05E-7	0,99780	8,24E-5
l1	0	54,07	82,6	1,95E+0	46,96	8,85E-2	2,01E-5	4,11E-7	0,99803	6,42E-5
SAR	0	54,07	69,6	2,41E+0	47,95	1,35E-1	1,60E-5	5,06E-7	0,99829	7,80E-5
l1SAR	0,85	54,07	78,4	2,97E+0	47,25	1,25E-1	1,88E-5	5,44E-7	0,99812	5,32E-5
TVSAR	0,85	54,07	84,4	1,52E+0	46,71	1,13E-1	2,13E-5	5,54E-7	0,99793	6,33E-5
TV	0	64,07	89,2	1,30E+0	47,89	1,07E-1	1,63E-5	4,01E-7	0,99901	2,43E-5
l1	0	64,07	81	3,39E+0	48,50	1,26E-1	1,41E-5	4,08E-7	0,99911	2,68E-5
SAR	0	64,07	74,8	1,30E+0	49,48	6,71E-2	1,13E-5	1,75E-7	0,99924	1,63E-5
l1SAR	0,85	64,07	77	7,07E-1	48,77	4,04E-2	1,33E-5	1,24E-7	0,99916	6,93E-6
TVSAR	0,85	64,07	82	2,55E+0	48,23	8,97E-2	1,50E-5	3,10E-7	0,99906	1,88E-5

Tabela A.31 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original *crahouse*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	2	0,00E+0	27,74	3,98E-2	1,68E-3	1,55E-5	0,84672	1,53E-3
II	0	25,07	2	0,00E+0	28,05	4,83E-2	1,57E-3	1,74E-5	0,85393	1,59E-3
SAR	0	25,07	24	0,00E+0	27,17	6,90E-2	1,92E-3	3,05E-5	0,82563	3,61E-3
II SAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	27,92	4,82E-2	1,62E-3	1,80E-5	0,85090	1,76E-3
TV SAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	27,68	4,30E-2	1,71E-3	1,69E-5	0,84310	1,87E-3
<hr/>										
TV	0	29,07	2	0,00E+0	30,24	3,45E-2	9,46E-4	7,51E-6	0,90779	1,43E-3
II	0	29,07	2	0,00E+0	30,41	7,94E-2	9,10E-4	1,66E-5	0,90888	1,58E-3
SAR	0	29,07	14,2	4,47E-1	29,55	1,87E-2	1,11E-3	4,77E-6	0,90027	1,78E-3
II SAR	0,85	29,07	2	0,00E+0	30,17	8,05E-2	9,61E-4	1,78E-5	0,90767	1,64E-3
TV SAR	0,85	29,07	2	0,00E+0	30,20	3,03E-2	9,55E-4	6,66E-6	0,90743	1,54E-3
<hr/>										
TV	0	34,07	3,8	4,47E-1	33,34	7,08E-2	4,64E-4	7,64E-6	0,95125	6,18E-4
II	0	34,07	4	0,00E+0	33,62	1,32E-1	4,35E-4	1,35E-5	0,95224	1,01E-3
SAR	0	34,07	12	0,00E+0	31,79	1,51E-2	6,62E-4	2,30E-6	0,94562	4,25E-4
II SAR	0,85	34,07	4,8	4,47E-1	33,54	7,27E-2	4,43E-4	7,47E-6	0,95253	6,75E-4
TV SAR	0,85	34,07	5	0,00E+0	33,34	3,90E-2	4,63E-4	4,17E-6	0,95154	6,60E-4
<hr/>										
TV	0	39,07	12	0,00E+0	36,86	3,32E-2	2,06E-4	1,57E-6	0,97874	3,13E-4
II	0	39,07	12,6	1,82E+0	37,27	2,29E-1	1,88E-4	1,00E-5	0,97970	6,84E-4
SAR	0	39,07	21	0,00E+0	34,45	1,92E-2	3,59E-4	1,59E-6	0,97031	2,84E-4
II SAR	0,85	39,07	13,2	4,47E-1	37,47	4,86E-2	1,79E-4	2,02E-6	0,98003	3,08E-4
TV SAR	0,85	39,07	14,6	5,48E-1	37,13	4,24E-2	1,94E-4	1,90E-6	0,97913	3,12E-4
<hr/>										
TV	0	44,07	19,8	4,47E-1	39,66	5,92E-2	1,08E-4	1,47E-6	0,99025	1,66E-4
II	0	44,07	21,2	8,37E-1	40,33	5,58E-2	9,27E-5	1,19E-6	0,99083	1,26E-4
SAR	0	44,07	56,2	1,64E+0	39,57	3,89E-2	1,10E-4	9,93E-7	0,98786	1,45E-4
II SAR	0,85	44,07	22,4	8,94E-1	41,00	5,00E-2	7,95E-5	9,16E-7	0,99145	1,08E-4
TV SAR	0,85	44,07	22	0,00E+0	40,54	5,85E-2	8,83E-5	1,19E-6	0,99101	1,23E-4
<hr/>										
TV	0	49,07	31,2	4,47E-1	41,88	6,29E-2	6,48E-5	9,42E-7	0,99507	9,64E-5
II	0	49,07	33,4	5,48E-1	43,18	1,15E-1	4,81E-5	1,27E-6	0,99571	7,83E-5
SAR	0	49,07	52,6	5,48E-1	44,56	2,82E-2	3,50E-5	2,27E-7	0,99561	8,02E-5
II SAR	0,85	49,07	32,2	4,47E-1	44,10	2,88E-2	3,89E-5	2,58E-7	0,99619	6,78E-5
TV SAR	0,85	49,07	32,4	5,48E-1	43,47	2,71E-2	4,50E-5	2,81E-7	0,99592	7,80E-5
<hr/>										
TV	0	54,07	89,2	2,86E+0	46,26	1,81E-1	2,37E-5	9,99E-7	0,99780	7,68E-5
II	0	54,07	78,6	3,13E+0	46,89	9,96E-2	2,05E-5	4,73E-7	0,99803	6,68E-5
SAR	0	54,07	62,6	8,94E-1	47,86	1,57E-1	1,64E-5	5,99E-7	0,99833	6,02E-5
II SAR	0,85	54,07	71,2	2,39E+0	47,12	8,64E-2	1,94E-5	3,86E-7	0,99814	5,87E-5
TV SAR	0,85	54,07	79,8	3,27E+0	46,63	1,12E-1	2,17E-5	5,61E-7	0,99795	6,93E-5
<hr/>										
TV	0	64,07	89,2	1,30E+0	47,89	1,07E-1	1,63E-5	4,01E-7	0,99901	2,43E-5
II	0	64,07	81	3,39E+0	48,50	1,26E-1	1,41E-5	4,08E-7	0,99911	2,68E-5
SAR	0	64,07	75,4	8,94E-1	49,48	6,73E-2	1,13E-5	1,76E-7	0,99924	1,54E-5
II SAR	0,85	64,07	77	7,07E-1	48,77	4,04E-2	1,33E-5	1,24E-7	0,99916	6,93E-6
TV SAR	0,85	64,07	82	2,55E+0	48,23	8,97E-2	1,50E-5	3,10E-7	0,99906	1,88E-5

Tabela A.32 – Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência SSIM, a partir da imagem HR original *crahouse*

Método SR	λ	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	39,41	1,64E+0	34,07	47,74	2,96E+0	44,07	201,59	1,46E+1	54,07	307,91	7,80E+0
II	0	25,07	41,64	1,79E+0	34,07	49,83	5,21E+0	44,07	189,52	1,31E+1	54,07	286,68	1,46E+1
SAR	0	25,07	65,74	2,30E+0	34,07	36,79	1,49E+0	44,07	177,61	1,31E+1	54,07	250,49	9,12E+0
II SAR	0,85	25,07	43,69	1,64E+0	34,07	39,28	1,86E+0	44,07	166,65	1,02E+1	54,07	266,66	1,25E+1
TV SAR	0,85	25,07	40,83	1,06E+0	34,07	39,29	1,57E+0	44,07	181,69	1,31E+1	54,07	286,52	1,22E+1
<hr/>													
TV	0	29,07	28,85	1,32E+0	39,07	78,01	3,46E+0	49,07	298,33	1,50E+1	64,07	305,35	1,64E+1
II	0	29,07	32,44	2,04E+0	39,07	85,73	1,34E+1	49,07	278,90	1,35E+1	64,07	282,03	2,35E+1
SAR	0	29,07	41,87	2,46E+0	39,07	60,67	2,83E+0	49,07	248,96	1,25E+1	64,07	253,91	1,27E+1
II SAR	0,85	29,07	30,87	1,29E+0	39,07	69,06	3,35E+0	49,07	250,85	1,44E+1	64,07	265,43	1,03E+1
TV SAR	0,85	29,07	26,21	1,84E+0	39,07	71,53	3,44E+0	49,07	268,35	1,37E+1	64,07	280,61	1,12E+1

Tabela A.33 – Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original *EIAcen120*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	22,4	2,19E+0	18,76	2,72E-1	1,33E-2	8,26E-4	0,58750	8,07E-3
l1	0	25,07	22,4	1,95E+0	18,64	3,24E-1	1,37E-2	1,03E-3	0,58419	9,38E-3
SAR	0	25,07	28	0,00E+0	21,17	4,32E-2	7,65E-3	7,63E-5	0,68053	2,38E-3
l1SAR	0,85	25,07	21	0,00E+0	19,68	5,95E-2	1,08E-2	1,47E-4	0,61084	1,62E-3
TVSAR	0,85	25,07	20	0,00E+0	19,73	5,67E-2	1,06E-2	1,39E-4	0,61321	1,85E-3
TV		29,07	19,6	8,94E-1	23,38	1,48E-1	4,60E-3	1,58E-4	0,74504	2,64E-3
l1	0	29,07	23	7,07E-1	23,19	1,33E-1	4,79E-3	1,47E-4	0,74390	2,81E-3
SAR	0	29,07	16	0,00E+0	23,65	3,53E-2	4,32E-3	3,52E-5	0,79191	2,30E-3
l1SAR	0,85	29,07	13,8	1,79E+0	23,87	1,96E-1	4,11E-3	1,90E-4	0,75681	4,07E-3
TVSAR	0,85	29,07	14	2,74E+0	23,89	1,84E-1	4,08E-3	1,74E-4	0,75620	2,70E-3
TV		34,07	27,4	5,48E-1	27,97	5,44E-2	1,60E-3	2,00E-5	0,88845	1,75E-3
l1	0	34,07	29,8	1,30E+0	25,79	5,41E-1	2,65E-3	3,41E-4	0,89377	2,62E-3
SAR	0	34,07	21,2	4,47E-1	26,18	3,13E-1	2,41E-3	1,82E-4	0,88514	2,09E-3
l1SAR	0,85	34,07	24,6	1,14E+0	26,92	5,99E-1	2,05E-3	2,91E-4	0,89563	1,68E-3
TVSAR	0,85	34,07	25,4	2,61E+0	28,46	1,59E-1	1,43E-3	5,33E-5	0,89144	4,16E-3
TV		39,07	47,2	8,35E+0	32,02	1,31E-1	6,28E-4	1,89E-5	0,95658	6,67E-3
l1	0	39,07	54,4	1,56E+1	29,02	5,53E+0	2,33E-3	2,54E-3	0,94815	1,29E-2
SAR	0	39,07	48,4	2,61E+0	29,63	3,30E-2	1,09E-3	8,25E-6	0,92774	5,98E-4
l1SAR	0,85	39,07	54,6	1,38E+1	31,86	3,56E+0	9,25E-4	1,06E-3	0,95349	4,44E-3
TVSAR	0,85	39,07	42	1,41E+0	32,74	7,68E-2	5,32E-4	9,44E-6	0,95223	8,73E-4
TV		44,07	63,4	5,48E-1	35,24	6,28E-2	2,99E-4	4,32E-6	0,97204	1,11E-3
l1	0	44,07	49,2	2,56E+1	24,70	6,72E+0	5,48E-3	3,01E-3	0,93699	2,29E-2
SAR	0	44,07	72,6	8,94E-1	34,27	4,17E-2	3,74E-4	3,58E-6	0,94920	1,67E-3
l1SAR	0,85	44,07	75	2,67E+1	34,31	5,79E+0	9,69E-4	1,71E-3	0,96743	1,54E-2
TVSAR	0,85	44,07	73,2	2,14E+1	35,87	1,45E-1	2,59E-4	8,82E-6	0,97357	7,75E-3
TV		49,07	173,2	8,82E+1	39,03	7,67E-2	1,25E-4	2,21E-6	0,98945	6,81E-3
l1	0	49,07	37,2	1,79E+0	20,46	6,23E-1	9,06E-3	1,31E-3	0,90812	1,38E-2
SAR	0	49,07	69,6	2,16E+1	35,60	5,72E+0	7,02E-4	1,23E-3	0,96191	1,49E-2
l1SAR	0,85	49,07	28,2	4,47E-1	22,70	4,48E-1	5,39E-3	5,52E-4	0,93315	5,11E-3
TVSAR	0,85	49,07	73,6	8,94E-1	39,09	7,25E-2	1,23E-4	2,07E-6	0,98012	1,14E-3
TV		54,07	75	3,85E+1	35,76	1,07E+1	1,62E-3	2,16E-3	0,97540	2,60E-2
l1	0	54,07	38	0,00E+0	19,82	4,13E-1	1,05E-2	9,82E-4	0,89826	7,91E-3
SAR	0	54,07	93,4	1,48E+1	40,02	6,52E+0	3,32E-4	6,29E-4	0,98322	1,50E-2
l1SAR	0,85	54,07	28,6	5,77E+0	21,55	4,80E-1	7,03E-3	7,82E-4	0,91492	1,06E-2
TVSAR	0,85	54,07	114,4	9,01E+1	39,18	7,74E+0	5,81E-4	1,16E-3	0,98169	2,76E-2
TV		64,07	48,8	4,93E+1	26,03	1,15E+1	6,56E-3	3,72E-3	0,93071	3,94E-2
l1	0	64,07	33	2,35E+0	18,21	1,83E-1	1,51E-2	6,40E-4	0,85858	8,96E-3
SAR	0	64,07	101,8	2,12E+1	42,97	8,26E+0	3,20E-4	6,68E-4	0,98984	1,90E-2
l1SAR	0,85	64,07	22	2,24E+0	19,51	1,59E-1	1,12E-2	4,07E-4	0,88044	7,27E-3
TVSAR	0,85	64,07	82,6	5,33E+1	36,71	1,38E+1	2,82E-3	3,87E-3	0,95811	5,76E-2

Tabela A.34 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR entre os testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original *EIAcen120*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	3	0,00E+0	21,31	1,74E-1	7,40E-3	2,94E-4	0,69048	3,75E-3
II	0	25,07	3	0,00E+0	21,68	2,94E-1	6,81E-3	4,68E-4	0,70148	3,98E-3
SAR	0	25,07	28	0,00E+0	21,17	4,32E-2	7,65E-3	7,63E-5	0,68053	2,38E-3
II SAR	0,85	25,07	3	0,00E+0	21,89	6,00E-2	6,47E-3	8,95E-5	0,70547	1,79E-3
TV SAR	0,85	25,07	3	0,00E+0	21,56	5,51E-2	6,98E-3	8,87E-5	0,68986	2,19E-3
TV	0	29,07	3	0,00E+0	24,47	2,17E-1	3,58E-3	1,80E-4	0,81168	3,01E-3
II	0	29,07	3	0,00E+0	24,37	2,32E-1	3,66E-3	2,02E-4	0,80518	5,22E-3
SAR	0	29,07	5	0,00E+0	23,69	3,66E-2	4,28E-3	3,62E-5	0,77960	2,59E-3
II SAR	0,85	29,07	3	0,00E+0	24,48	2,34E-1	3,57E-3	2,00E-4	0,80699	2,75E-3
TV SAR	0,85	29,07	3	0,00E+0	24,43	2,05E-1	3,61E-3	1,72E-4	0,80352	3,79E-3
TV	0	34,07	5	0,00E+0	28,61	3,31E-2	1,38E-3	1,05E-5	0,90607	1,32E-3
II	0	34,07	4,2	4,47E-1	26,71	4,97E-1	2,14E-3	2,46E-4	0,90533	2,72E-3
SAR	0	34,07	21,2	4,47E-1	26,18	3,13E-1	2,41E-3	1,82E-4	0,88514	2,09E-3
II SAR	0,85	34,07	5,2	4,47E-1	27,10	6,36E-1	1,97E-3	3,00E-4	0,90303	1,96E-3
TV SAR	0,85	34,07	12,4	9,84E+0	28,52	1,91E-1	1,41E-3	6,37E-5	0,89732	1,56E-3
TV	0	39,07	22,8	2,19E+1	32,75	3,15E-1	5,32E-4	4,03E-5	0,96785	1,01E-3
II	0	39,07	35,6	2,91E+1	29,45	4,95E+0	1,88E-3	1,92E-3	0,94796	1,32E-2
SAR	0	39,07	48,4	2,61E+0	29,63	3,30E-2	1,09E-3	8,25E-6	0,92774	5,98E-4
II SAR	0,85	39,07	42,4	2,10E+1	31,90	3,49E+0	9,04E-4	1,01E-3	0,95272	6,52E-3
TV SAR	0,85	39,07	14,4	5,48E-1	33,13	5,14E-2	4,87E-4	5,76E-6	0,96329	7,41E-4
TV	0	44,07	21,4	5,48E-1	37,09	1,23E-1	1,95E-4	5,56E-6	0,98826	4,58E-4
II	0	44,07	13,2	2,28E+1	25,65	6,59E+0	4,34E-3	2,37E-3	0,93405	2,89E-2
SAR	0	44,07	65,2	8,04E+0	34,27	4,10E-2	3,74E-4	3,52E-6	0,94952	1,41E-3
II SAR	0,85	44,07	38,6	2,00E+1	35,01	6,02E+0	8,89E-4	1,61E-3	0,97473	2,30E-2
TV SAR	0,85	44,07	39,6	3,99E+1	37,15	8,56E-1	1,96E-4	4,36E-5	0,98713	7,57E-4
TV	0	49,07	154,8	1,13E+2	40,25	1,60E+0	9,94E-5	3,32E-5	0,99484	5,97E-4
II	0	49,07	3	0,00E+0	21,41	5,83E-1	7,27E-3	9,75E-4	0,90624	1,16E-2
SAR	0	49,07	43	6,71E+0	36,05	5,97E+0	6,87E-4	1,24E-3	0,96995	1,93E-2
II SAR	0,85	49,07	3,8	4,47E-1	22,94	4,32E-1	5,10E-3	5,01E-4	0,92741	6,50E-3
TV SAR	0,85	49,07	30	0,00E+0	42,26	8,49E-2	5,94E-5	1,15E-6	0,99537	8,45E-5
TV	0	54,07	32	2,87E+1	37,64	1,16E+1	1,27E-3	1,71E-3	0,97610	2,97E-2
II	0	54,07	3	0,00E+0	20,72	4,32E-1	8,50E-3	8,33E-4	0,89828	6,68E-3
SAR	0	54,07	58,4	4,83E+0	40,28	6,66E+0	3,29E-4	6,31E-4	0,98504	1,60E-2
II SAR	0,85	54,07	3,6	5,48E-1	21,96	4,55E-1	6,40E-3	6,91E-4	0,91156	8,80E-3
TV SAR	0,85	54,07	82,2	1,03E+2	41,03	9,12E+0	5,68E-4	1,17E-3	0,98441	2,91E-2
TV	0	64,07	21,6	4,16E+1	27,21	1,10E+1	4,75E-3	2,73E-3	0,93552	3,66E-2
II	0	64,07	3	0,00E+0	19,22	1,60E-1	1,20E-2	4,43E-4	0,86667	8,26E-3
SAR	0	64,07	101,8	2,12E+1	42,97	8,26E+0	3,20E-4	6,68E-4	0,98984	1,90E-2
II SAR	0,85	64,07	3	0,00E+0	19,96	1,48E-1	1,01E-2	3,42E-4	0,87779	7,25E-3
TV SAR	0,85	64,07	51,4	4,38E+1	37,09	1,38E+1	2,57E-3	3,54E-3	0,96069	5,34E-2

Tabela A.35 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original *EIAcen120*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	1,4	5,48E-1	19,56	1,00E+0	1,13E-2	2,48E-3	0,75301	7,39E-3
l1	0	25,07	1,6	5,48E-1	19,99	1,00E+0	1,02E-2	2,38E-3	0,75944	9,46E-3
SAR	0	25,07	28	0,00E+0	21,17	4,32E-2	7,65E-3	7,63E-5	0,68053	2,38E-3
l1SAR	0,85	25,07	1	0,00E+0	19,18	8,03E-2	1,21E-2	2,25E-4	0,76937	2,97E-3
TVSAR	0,85	25,07	1	0,00E+0	19,27	5,91E-2	1,18E-2	1,61E-4	0,76780	2,80E-3
TV	0	29,07	2	0,00E+0	23,25	4,67E-1	4,76E-3	5,20E-4	0,87007	6,63E-3
l1	0	29,07	2	0,00E+0	22,78	4,67E-1	5,30E-3	6,09E-4	0,86096	4,33E-3
SAR	0	29,07	16	0,00E+0	23,65	3,53E-2	4,32E-3	3,52E-5	0,79191	2,30E-3
l1SAR	0,85	29,07	2	0,00E+0	22,91	3,82E-1	5,13E-3	4,76E-4	0,85590	5,01E-3
TVSAR	0,85	29,07	2	0,00E+0	23,41	4,47E-1	4,58E-3	4,79E-4	0,86466	4,11E-3
TV	0	34,07	3	0,00E+0	27,88	2,74E-2	1,63E-3	1,03E-5	0,92961	7,55E-4
l1	0	34,07	3	0,00E+0	26,22	4,81E-1	2,40E-3	2,65E-4	0,91382	2,01E-3
SAR	0	34,07	3,6	1,34E+0	25,32	1,43E-1	2,94E-3	9,90E-5	0,90291	3,01E-3
l1SAR	0,85	34,07	3	0,00E+0	26,41	6,39E-1	2,31E-3	3,61E-4	0,91410	1,81E-3
TVSAR	0,85	34,07	2,2	4,47E-1	25,07	8,41E-1	3,15E-3	5,33E-4	0,92337	2,06E-3
TV	0	39,07	10,4	5,37E+0	32,34	2,19E-1	5,84E-4	3,04E-5	0,97085	8,27E-4
l1	0	39,07	15,2	7,92E+0	27,79	3,88E+0	2,29E-3	1,96E-3	0,95474	1,80E-2
SAR	0	39,07	9	0,00E+0	27,52	8,34E-3	1,77E-3	3,40E-6	0,94192	4,10E-4
l1SAR	0,85	39,07	19,8	6,02E+0	30,14	2,60E+0	1,16E-3	9,30E-4	0,96272	9,52E-3
TVSAR	0,85	39,07	9	0,00E+0	32,40	3,63E-2	5,75E-4	4,79E-6	0,96791	4,13E-4
TV	0	44,07	16,8	4,47E-1	36,71	1,56E-1	2,13E-4	7,67E-6	0,98944	1,60E-4
l1	0	44,07	21,6	1,80E+1	24,83	6,20E+0	5,05E-3	2,75E-3	0,93985	2,79E-2
SAR	0	44,07	23,8	8,37E-1	32,27	1,81E-1	5,94E-4	2,45E-5	0,96242	5,37E-4
l1SAR	0,85	44,07	35,8	6,94E+0	33,94	5,58E+0	9,87E-4	1,70E-3	0,97878	2,17E-2
TVSAR	0,85	44,07	35,8	4,20E+1	36,73	6,19E-1	2,14E-4	3,34E-5	0,98840	6,71E-4
TV	0	49,07	153,2	1,16E+2	40,12	1,42E+0	1,01E-4	3,05E-5	0,99505	8,89E-4
l1	0	49,07	11,2	1,50E+1	20,95	3,49E-1	8,06E-3	6,65E-4	0,90945	1,25E-2
SAR	0	49,07	35,4	2,51E+0	35,03	5,40E+0	7,24E-4	1,22E-3	0,97397	2,16E-2
l1SAR	0,85	49,07	28,2	4,47E-1	22,70	4,48E-1	5,39E-3	5,52E-4	0,93315	5,11E-3
TVSAR	0,85	49,07	26,6	5,48E-1	41,91	1,18E-1	6,45E-5	1,74E-6	0,99579	6,64E-5
TV	0	54,07	38,8	7,05E+0	36,75	1,18E+1	1,61E-3	2,17E-3	0,97778	2,82E-2
l1	0	54,07	4	0,00E+0	20,47	4,48E-1	9,01E-3	9,14E-4	0,90032	7,30E-3
SAR	0	54,07	50,2	9,39E+0	39,42	6,18E+0	3,40E-4	6,25E-4	0,98638	1,67E-2
l1SAR	0,85	54,07	16	9,51E+0	21,67	3,50E-1	6,82E-3	5,41E-4	0,91536	1,08E-2
TVSAR	0,85	54,07	80,2	1,05E+2	40,85	8,98E+0	5,69E-4	1,17E-3	0,98451	2,92E-2
TV	0	64,07	20,8	3,98E+1	27,17	1,09E+1	4,76E-3	2,73E-3	0,93553	3,66E-2
l1	0	64,07	3,2	4,47E-1	19,15	2,78E-1	1,22E-2	7,98E-4	0,86682	8,16E-3
SAR	0	64,07	101,8	2,12E+1	42,97	8,26E+0	3,20E-4	6,68E-4	0,98984	1,90E-2
l1SAR	0,85	64,07	4	0,00E+0	19,81	1,44E-1	1,04E-2	3,43E-4	0,88187	6,23E-3
TVSAR	0,85	64,07	47,2	3,95E+1	36,82	1,36E+1	2,60E-3	3,57E-3	0,96122	5,29E-2

Tabela A.36 – Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência PSNR, a partir da imagem HR original *EIAcen120*

Método SR	λ	SNR (dB)	Média		Desvio Padrão	SNR (dB)	Média		Desvio Padrão	SNR (dB)	Média		Desvio Padrão
			Média	Desvio Padrão			Média	Desvio Padrão			Média	Desvio Padrão	
TV	0	25,07	59,97	5,53E+0	34,07	74,19	9,12E+0	44,07	182,90	1,94E+1	54,07	208,72	1,12E+2
l1	0	25,07	60,21	3,86E+0	34,07	82,43	9,22E+0	44,07	148,20	9,66E+1	54,07	102,55	8,72E+0
SAR	0	25,07	71,83	6,19E+0	34,07	58,03	4,94E+0	44,07	203,38	2,48E+1	54,07	250,55	4,90E+1
l1SAR	0,85	25,07	56,66	4,69E+0	34,07	68,33	6,01E+0	44,07	248,33	1,01E+2	54,07	78,95	1,08E+1
TVSAR	0,85	25,07	54,10	5,25E+0	34,07	68,11	9,56E+0	44,07	204,44	5,51E+1	54,07	308,63	2,52E+2
TV	0	29,07	54,71	5,66E+0	39,07	123,13	1,85E+1	49,07	483,94	2,62E+2	64,07	140,66	1,45E+2
l1	0	29,07	64,32	6,96E+0	39,07	168,02	5,25E+1	49,07	101,10	1,41E+1	64,07	89,27	9,76E+0
SAR	0	29,07	44,96	4,18E+0	39,07	126,89	1,55E+1	49,07	196,54	6,84E+1	64,07	258,28	5,43E+1
l1SAR	0,85	29,07	41,67	6,45E+0	39,07	181,79	6,43E+1	49,07	76,55	7,91E+0	64,07	60,72	5,63E+0
TVSAR	0,85	29,07	40,71	1,09E+1	39,07	110,33	1,14E+1	49,07	204,50	2,12E+1	64,07	244,58	1,67E+2

Tabela A.37 – Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original *EIAcen120*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	14	2,24E+0	18,74	6,91E-1	1,35E-2	2,38E-3	0,58505	2,07E-2
II	0	25,07	15	2,24E+0	18,47	6,61E-1	1,44E-2	2,40E-3	0,57981	1,76E-2
SAR	0	25,07	19	0,00E+0	21,14	3,55E-2	7,69E-3	6,30E-5	0,67767	2,73E-3
II SAR	0,85	25,07	14,4	8,94E-1	19,59	1,90E-1	1,10E-2	4,91E-4	0,60683	5,63E-3
TV SAR	0,85	25,07	14,4	8,94E-1	19,48	2,06E-1	1,13E-2	5,32E-4	0,60478	7,23E-3
TV	0	29,07	12,4	5,48E-1	23,46	1,34E-1	4,51E-3	1,40E-4	0,74785	2,01E-3
II	0	29,07	13	0,00E+0	23,27	6,18E-2	4,71E-3	6,68E-5	0,74570	2,19E-3
SAR	0	29,07	12	0,00E+0	23,67	2,94E-2	4,30E-3	2,92E-5	0,79315	2,63E-3
II SAR	0,85	29,07	10,4	5,48E-1	23,81	2,28E-1	4,16E-3	2,22E-4	0,75731	5,55E-3
TV SAR	0,85	29,07	9	0,00E+0	24,11	6,67E-2	3,88E-3	5,98E-5	0,76068	2,49E-3
TV	0	34,07	19	0,00E+0	27,98	6,67E-2	1,59E-3	2,45E-5	0,88824	2,79E-3
II	0	34,07	18,8	8,37E-1	26,03	2,97E-1	2,50E-3	1,70E-4	0,89332	3,04E-3
SAR	0	34,07	16	0,00E+0	26,30	2,03E-2	2,35E-3	1,10E-5	0,88397	2,02E-3
II SAR	0,85	34,07	17,2	8,37E-1	27,09	1,57E-1	1,95E-3	7,14E-5	0,89529	3,65E-3
TV SAR	0,85	34,07	17,4	8,94E-1	28,43	1,85E-1	1,44E-3	6,26E-5	0,89152	4,96E-3
TV	0	39,07	31,8	3,49E+0	32,02	6,96E-2	6,28E-4	1,01E-5	0,95686	6,10E-3
II	0	39,07	48,4	1,56E+1	30,90	4,62E+0	1,49E-3	2,21E-3	0,95175	1,24E-2
SAR	0	39,07	12,2	1,26E+1	26,30	9,19E-1	2,39E-3	4,80E-4	0,93651	1,06E-3
II SAR	0,85	39,07	39,4	1,65E+1	30,56	3,97E+0	1,23E-3	1,07E-3	0,95352	3,48E-3
TV SAR	0,85	39,07	29,8	4,47E-1	32,75	6,05E-2	5,31E-4	7,38E-6	0,95245	9,40E-4
TV	0	44,07	50,4	3,21E+0	35,34	1,23E-1	2,92E-4	8,22E-6	0,97554	7,15E-3
II	0	44,07	79,2	4,44E+0	36,73	8,83E-2	2,12E-4	4,30E-6	0,97705	9,16E-4
SAR	0	44,07	16,4	1,33E+1	26,13	1,10E+0	2,49E-3	5,28E-4	0,94119	6,63E-3
II SAR	0,85	44,07	61,2	2,37E+1	34,53	5,40E+0	8,14E-4	1,37E-3	0,96913	1,15E-2
TV SAR	0,85	44,07	47,6	5,48E-1	36,02	1,06E-1	2,50E-4	6,11E-6	0,97084	1,16E-3
TV	0	49,07	59	1,00E+0	39,05	1,22E-1	1,25E-4	3,46E-6	0,98192	9,78E-4
II	0	49,07	23	0,00E+0	21,30	5,56E-1	7,46E-3	9,47E-4	0,92317	8,09E-3
SAR	0	49,07	15,4	1,70E+1	26,62	1,32E+0	2,25E-3	6,33E-4	0,94589	8,54E-3
II SAR	0,85	49,07	62,6	4,08E+1	32,88	9,71E+0	2,45E-3	3,23E-3	0,95954	3,26E-2
TV SAR	0,85	49,07	58,6	8,94E-1	39,18	1,02E-1	1,21E-4	2,84E-6	0,98048	9,55E-4
TV	0	54,07	50,6	1,88E+1	36,13	1,08E+1	1,51E-3	2,01E-3	0,97722	2,43E-2
II	0	54,07	21,6	3,13E+0	19,53	4,69E-1	1,12E-2	1,17E-3	0,89039	1,22E-2
SAR	0	54,07	9,4	1,43E+1	26,16	1,13E+0	2,48E-3	5,34E-4	0,94277	6,91E-3
II SAR	0,85	54,07	17,8	1,64E+0	21,37	5,82E-1	7,34E-3	9,57E-4	0,91427	1,07E-2
TV SAR	0,85	54,07	67	8,94E+0	42,58	3,43E+0	7,64E-5	8,42E-5	0,99396	1,27E-3
TV	0	64,07	67	4,67E+1	36,51	1,43E+1	3,33E-3	4,54E-3	0,96349	4,88E-2
II	0	64,07	19,6	1,34E+0	18,32	3,19E-2	1,47E-2	1,08E-4	0,86202	5,58E-3
SAR	0	64,07	22,2	1,75E+1	27,15	1,36E+0	2,01E-3	6,48E-4	0,94895	8,46E-3
II SAR	0,85	64,07	14,8	2,17E+0	19,65	1,69E-1	1,08E-2	4,25E-4	0,88413	5,45E-3
TV SAR	0,85	64,07	70,2	3,27E+1	42,28	1,10E+1	1,09E-3	2,40E-3	0,98370	3,44E-2

Tabela A.38 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR entre os testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original *EIAcen120*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	3	0,00E+0	21,24	5,05E-1	7,56E-3	9,46E-4	0,68568	9,01E-3
l1	0	25,07	3	0,00E+0	21,43	5,31E-1	7,24E-3	9,56E-4	0,69623	5,80E-3
SAR	0	25,07	19	0,00E+0	21,14	3,55E-2	7,69E-3	6,30E-5	0,67767	2,73E-3
l1SAR	0,85	25,07	3	0,00E+0	21,74	2,12E-1	6,71E-3	3,37E-4	0,70140	2,50E-3
TVSAR	0,85	25,07	3	0,00E+0	21,28	1,78E-1	7,44E-3	3,05E-4	0,68263	5,17E-3
TV	0	29,07	3	0,00E+0	24,51	2,10E-1	3,54E-3	1,71E-4	0,81427	4,10E-3
l1	0	29,07	3	0,00E+0	24,50	7,44E-2	3,55E-3	6,08E-5	0,80570	2,02E-3
SAR	0	29,07	4,6	5,48E-1	23,71	3,16E-2	4,25E-3	3,10E-5	0,77928	3,17E-3
l1SAR	0,85	29,07	3	0,00E+0	24,38	3,02E-1	3,65E-3	2,57E-4	0,80885	1,56E-3
TVSAR	0,85	29,07	3	0,00E+0	24,65	5,25E-2	3,42E-3	4,14E-5	0,80549	2,56E-3
TV	0	34,07	5	0,00E+0	28,60	5,19E-2	1,38E-3	1,65E-5	0,90571	2,00E-3
l1	0	34,07	4	0,00E+0	26,93	4,57E-1	2,04E-3	2,24E-4	0,90550	3,34E-3
SAR	0	34,07	16	0,00E+0	26,30	2,03E-2	2,35E-3	1,10E-5	0,88397	2,02E-3
l1SAR	0,85	34,07	5,6	1,34E+0	27,28	2,37E-1	1,87E-3	1,05E-4	0,90307	6,88E-4
TVSAR	0,85	34,07	10,2	4,92E+0	28,48	2,10E-1	1,42E-3	7,08E-5	0,89704	2,59E-3
TV	0	39,07	18,4	1,10E+1	32,70	3,77E-1	5,39E-4	4,93E-5	0,96727	6,55E-4
l1	0	39,07	45	2,31E+1	31,09	4,18E+0	1,28E-3	1,72E-3	0,95107	1,39E-2
SAR	0	39,07	11	1,37E+1	28,55	1,13E+0	1,44E-3	3,87E-4	0,93400	3,34E-3
l1SAR	0,85	39,07	32,6	2,44E+1	30,63	3,87E+0	1,19E-3	1,02E-3	0,95208	5,53E-3
TVSAR	0,85	39,07	14,4	5,48E-1	33,13	6,13E-2	4,87E-4	6,88E-6	0,96320	1,01E-3
TV	0	44,07	28,2	1,56E+1	36,82	7,26E-1	2,10E-4	3,90E-5	0,98842	3,89E-4
l1	0	44,07	53	5,43E+0	37,28	8,94E-2	1,87E-4	3,83E-6	0,98505	4,65E-4
SAR	0	44,07	15,6	1,43E+1	27,82	2,13E+0	1,82E-3	8,68E-4	0,94933	1,14E-2
l1SAR	0,85	44,07	35,6	1,78E+1	35,23	5,64E+0	7,46E-4	1,29E-3	0,97653	1,91E-2
TVSAR	0,85	44,07	22,2	4,47E-1	37,61	8,92E-2	1,73E-4	3,57E-6	0,98695	5,26E-4
TV	0	49,07	31	0,00E+0	41,97	1,59E-1	6,36E-5	2,34E-6	0,99546	6,64E-5
l1	0	49,07	3	0,00E+0	22,22	5,58E-1	6,04E-3	7,67E-4	0,91838	6,40E-3
SAR	0	49,07	14,2	1,81E+1	29,19	1,02E+0	1,23E-3	2,99E-4	0,95984	4,20E-3
l1SAR	0,85	49,07	38,6	3,17E+1	33,95	1,05E+1	2,31E-3	3,08E-3	0,96441	4,09E-2
TVSAR	0,85	49,07	30,6	5,48E-1	42,23	1,30E-1	5,99E-5	1,80E-6	0,99519	1,34E-4
TV	0	54,07	25,6	1,97E+1	38,21	1,18E+1	1,19E-3	1,61E-3	0,97715	2,93E-2
l1	0	54,07	3	0,00E+0	20,50	4,47E-1	8,96E-3	9,04E-4	0,89234	9,18E-3
SAR	0	54,07	7,8	1,52E+1	29,59	7,90E-1	1,11E-3	2,27E-4	0,96159	3,61E-3
l1SAR	0,85	54,07	3,4	5,48E-1	21,70	5,58E-1	6,81E-3	8,56E-4	0,90889	9,82E-3
TVSAR	0,85	54,07	47,8	1,97E+1	44,57	4,54E+0	6,29E-5	9,17E-5	0,99701	2,98E-3
TV	0	64,07	61,2	5,32E+1	37,03	1,36E+1	2,47E-3	3,36E-3	0,96593	4,55E-2
l1	0	64,07	3	0,00E+0	19,32	7,04E-2	1,17E-2	1,88E-4	0,86979	4,28E-3
SAR	0	64,07	21,4	1,86E+1	28,86	9,87E-1	1,33E-3	2,86E-4	0,95837	4,44E-3
l1SAR	0,85	64,07	3	0,00E+0	20,08	1,78E-1	9,82E-3	4,05E-4	0,88070	6,11E-3
TVSAR	0,85	64,07	64,6	3,46E+1	42,43	1,08E+1	1,00E-3	2,20E-3	0,98336	3,53E-2

Tabela A.39 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM entre os testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original *EIAcen120*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	1	0,00E+0	18,81	4,01E-1	1,32E-2	1,30E-3	0,75252	1,64E-2
II	0	25,07	1,6	5,48E-1	19,88	1,14E+0	1,06E-2	2,66E-3	0,75254	1,35E-2
SAR	0	25,07	19	0,00E+0	21,14	3,55E-2	7,69E-3	6,30E-5	0,67767	2,73E-3
II SAR	0,85	25,07	1	0,00E+0	18,96	2,26E-1	1,27E-2	6,78E-4	0,75976	6,78E-3
TV SAR	0,85	25,07	1	0,00E+0	18,99	2,29E-1	1,26E-2	6,61E-4	0,75399	9,87E-3
<hr/>										
TV	0	29,07	2	0,00E+0	23,23	5,00E-1	4,78E-3	5,60E-4	0,87117	5,54E-3
II	0	29,07	2	0,00E+0	22,98	7,41E-2	5,03E-3	8,52E-5	0,86350	1,51E-3
SAR	0	29,07	12	0,00E+0	23,67	2,94E-2	4,30E-3	2,92E-5	0,79315	2,63E-3
II SAR	0,85	29,07	2	0,00E+0	22,76	4,89E-1	5,33E-3	6,08E-4	0,85417	7,12E-3
TV SAR	0,85	29,07	2	0,00E+0	23,76	2,81E-2	4,21E-3	2,72E-5	0,86932	2,02E-3
<hr/>										
TV	0	34,07	3	0,00E+0	27,87	3,58E-2	1,63E-3	1,34E-5	0,92967	8,66E-4
II	0	34,07	3	0,00E+0	26,40	5,05E-1	2,31E-3	2,85E-4	0,91387	2,87E-3
SAR	0	34,07	3	0,00E+0	25,38	8,14E-3	2,90E-3	5,44E-6	0,90430	1,15E-3
II SAR	0,85	34,07	3	0,00E+0	26,52	3,89E-1	2,24E-3	2,11E-4	0,91462	9,01E-4
TV SAR	0,85	34,07	2,2	4,47E-1	25,06	8,39E-1	3,16E-3	5,33E-4	0,92342	1,54E-3
<hr/>										
TV	0	39,07	10	4,47E+0	32,28	3,25E-1	5,93E-4	4,63E-5	0,97076	1,08E-3
II	0	39,07	21,2	2,59E+0	28,88	3,49E+0	1,81E-3	2,03E-3	0,96006	1,70E-2
SAR	0	39,07	7,6	6,31E+0	26,16	7,32E-1	2,45E-3	3,97E-4	0,93666	1,26E-3
II SAR	0,85	39,07	20,4	2,51E+0	29,28	2,81E+0	1,40E-3	9,18E-4	0,96033	9,37E-3
TV SAR	0,85	39,07	9	0,00E+0	32,39	4,78E-2	5,77E-4	6,38E-6	0,96788	4,49E-4
<hr/>										
TV	0	44,07	24,8	1,74E+1	36,53	5,69E-1	2,24E-4	3,17E-5	0,98930	6,48E-4
II	0	44,07	42	5,24E+0	35,94	1,13E-1	2,55E-4	6,63E-6	0,98883	1,50E-4
SAR	0	44,07	15,6	1,43E+1	27,82	2,13E+0	1,82E-3	8,68E-4	0,94933	1,14E-2
II SAR	0,85	44,07	31,2	7,05E+0	34,20	5,21E+0	8,30E-4	1,36E-3	0,98053	1,79E-2
TV SAR	0,85	44,07	16,6	5,48E-1	36,97	1,81E-1	2,01E-4	8,43E-6	0,98878	1,64E-4
<hr/>										
TV	0	49,07	27	0,00E+0	41,65	1,30E-1	6,84E-5	2,06E-6	0,99600	3,09E-5
II	0	49,07	15,8	9,86E+0	21,49	3,59E-1	7,11E-3	5,73E-4	0,92337	7,80E-3
SAR	0	49,07	14,2	1,81E+1	29,19	1,02E+0	1,23E-3	2,99E-4	0,95984	4,20E-3
II SAR	0,85	49,07	40	2,02E+1	33,50	1,03E+1	2,44E-3	3,24E-3	0,96694	3,93E-2
TV SAR	0,85	49,07	26,4	5,48E-1	41,82	9,79E-2	6,57E-5	1,48E-6	0,99578	2,79E-5
<hr/>										
TV	0	54,07	34,8	4,44E+0	37,73	1,22E+1	1,50E-3	2,02E-3	0,97942	2,63E-2
II	0	54,07	4	0,00E+0	20,23	4,66E-1	9,52E-3	9,97E-4	0,89400	9,82E-3
SAR	0	54,07	7,8	1,52E+1	29,59	7,90E-1	1,11E-3	2,27E-4	0,96159	3,61E-3
II SAR	0,85	54,07	17,8	1,64E+0	21,37	5,82E-1	7,34E-3	9,57E-4	0,91427	1,07E-2
TV SAR	0,85	54,07	45,4	2,10E+1	44,37	4,43E+0	6,40E-5	9,11E-5	0,99712	3,04E-3
<hr/>										
TV	0	64,07	57	4,93E+1	36,79	1,34E+1	2,47E-3	3,36E-3	0,96596	4,56E-2
II	0	64,07	3,2	4,47E-1	19,26	8,18E-2	1,19E-2	2,25E-4	0,86989	4,05E-3
SAR	0	64,07	21,4	1,86E+1	28,86	9,87E-1	1,33E-3	2,86E-4	0,95837	4,44E-3
II SAR	0,85	64,07	4	0,00E+0	19,95	1,67E-1	1,01E-2	3,92E-4	0,88518	4,84E-3
TV SAR	0,85	64,07	60,6	3,18E+1	42,14	1,07E+1	1,01E-3	2,22E-3	0,98389	3,42E-2

Tabela A.40 – Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência SSIM, a partir da imagem HR original *EIAcen120*

Método	λ	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	38,69	3,24E+0	34,07	51,87	2,50E+0	44,07	144,07	6,83E+0	54,07	142,92	5,64E+1
II	0	25,07	42,51	4,61E+0	34,07	52,92	3,19E+0	44,07	264,58	1,99E+1	54,07	59,85	5,81E+0
SAR	0	25,07	49,37	2,21E+0	34,07	43,71	1,78E+0	44,07	45,71	3,35E+1	54,07	29,32	3,67E+1
II SAR	0,85	25,07	40,54	2,62E+0	34,07	49,03	3,18E+0	44,07	199,11	8,09E+1	54,07	48,86	3,11E+0
TV SAR	0,85	25,07	38,92	1,46E+0	34,07	48,65	6,77E+0	44,07	136,64	5,79E+0	54,07	183,33	2,56E+1
TV	0	29,07	35,58	2,45E+0	39,07	83,96	9,22E+0	49,07	168,05	7,63E+0	64,07	205,38	1,45E+2
II	0	29,07	39,35	1,78E+0	39,07	160,48	5,85E+1	49,07	64,34	2,84E+0	64,07	54,97	5,04E+0
SAR	0	29,07	34,05	1,51E+0	39,07	35,59	3,17E+1	49,07	44,42	4,41E+1	64,07	61,01	4,51E+1
II SAR	0,85	29,07	31,90	1,70E+0	39,07	127,61	6,29E+1	49,07	197,85	1,36E+2	64,07	43,34	4,37E+0
TV SAR	0,85	29,07	26,78	1,24E+0	39,07	76,48	3,16E+0	49,07	163,05	5,78E+0	64,07	224,48	1,08E+2

Tabela A.41 – Resultados da última iteração entre os testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original *lena*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	18	0,00E+0	26,66	2,22E-2	2,16E-3	1,10E-5	0,76258	1,99E-3
l1	0	25,07	19,4	5,48E-1	26,47	4,60E-2	2,25E-3	2,40E-5	0,75565	2,37E-3
SAR	0	25,07	27,8	4,47E-1	27,88	1,83E-2	1,63E-3	6,86E-6	0,84707	1,53E-3
l1SAR	0,85	25,07	18	0,00E+0	27,09	3,84E-2	1,95E-3	1,73E-5	0,77947	2,27E-3
TVSAR	0,85	25,07	17	0,00E+0	27,15	3,20E-2	1,93E-3	1,42E-5	0,78280	2,09E-3
TV		29,07	19,8	1,48E+0	30,29	3,96E-2	9,36E-4	8,54E-6	0,89521	1,67E-3
l1	0	29,07	22,4	5,48E-1	30,10	4,57E-2	9,76E-4	1,03E-5	0,89266	1,60E-3
SAR	0	29,07	17	0,00E+0	29,55	2,14E-2	1,11E-3	5,45E-6	0,90743	1,14E-3
l1SAR	0,85	29,07	12	0,00E+0	30,46	6,52E-2	9,00E-4	1,36E-5	0,90055	1,65E-3
TVSAR	0,85	29,07	11	0,00E+0	30,44	3,52E-2	9,03E-4	7,32E-6	0,90113	1,67E-3
TV		34,07	28,2	4,47E-1	33,60	1,17E-1	4,37E-4	1,17E-5	0,95572	1,20E-3
l1	0	34,07	33,4	1,52E+0	33,52	8,32E-2	4,45E-4	8,45E-6	0,95597	1,09E-3
SAR	0	34,07	19,2	4,47E-1	31,36	1,49E-2	7,32E-4	2,51E-6	0,94204	5,55E-4
l1SAR	0,85	34,07	25,4	5,48E-1	33,60	8,45E-2	4,36E-4	8,41E-6	0,95600	9,96E-4
TVSAR	0,85	34,07	24	0,00E+0	33,53	7,53E-2	4,44E-4	7,61E-6	0,95556	9,94E-4
TV		39,07	45	0,00E+0	36,60	4,42E-2	2,19E-4	2,23E-6	0,97760	2,54E-4
l1	0	39,07	58,2	1,31E+1	36,67	8,49E-2	2,15E-4	4,23E-6	0,97830	4,26E-4
SAR	0	39,07	48	7,07E-1	33,60	2,13E-2	4,36E-4	2,14E-6	0,96294	1,48E-4
l1SAR	0,85	39,07	43,4	5,48E-1	36,86	4,63E-2	2,06E-4	2,20E-6	0,97841	3,24E-4
TVSAR	0,85	39,07	43	0,00E+0	36,70	3,18E-2	2,14E-4	1,57E-6	0,97776	2,81E-4
TV		44,07	73,2	2,39E+0	40,19	1,53E-1	9,58E-5	3,34E-6	0,98704	3,87E-4
l1	0	44,07	81	1,25E+1	40,60	1,77E-1	8,72E-5	3,52E-6	0,98836	3,41E-4
SAR	0	44,07	91,8	1,30E+0	38,15	5,20E-2	1,53E-4	1,84E-6	0,98331	2,88E-4
l1SAR	0,85	44,07	71,6	2,41E+0	40,77	1,30E-1	8,39E-5	2,50E-6	0,98854	2,92E-4
TVSAR	0,85	44,07	70	3,16E+0	40,45	1,18E-1	9,01E-5	2,43E-6	0,98753	3,02E-4
TV		49,07	90,6	1,82E+0	44,80	2,16E-1	3,32E-5	1,66E-6	0,99423	2,05E-4
l1	0	49,07	97	3,54E+0	45,23	1,99E-1	3,00E-5	1,38E-6	0,99481	1,50E-4
SAR	0	49,07	97,2	4,47E-1	43,79	8,52E-2	4,18E-5	8,15E-7	0,99331	2,65E-4
l1SAR	0,85	49,07	87,4	1,14E+0	45,31	1,39E-1	2,94E-5	9,47E-7	0,99475	1,54E-4
TVSAR	0,85	49,07	86,6	8,94E-1	44,91	1,73E-1	3,23E-5	1,29E-6	0,99423	2,03E-4
TV		54,07	102,2	2,17E+0	49,92	1,87E-1	1,02E-5	4,38E-7	0,99843	4,67E-5
l1	0	54,07	111,4	1,20E+1	49,80	5,23E-1	1,05E-5	1,25E-6	0,99845	1,53E-4
SAR	0	54,07	114,2	2,59E+0	49,61	1,36E-1	1,09E-5	3,43E-7	0,99824	5,22E-5
l1SAR	0,85	54,07	102	1,22E+0	50,19	1,48E-1	9,59E-6	3,25E-7	0,99852	4,24E-5
TVSAR	0,85	54,07	98,6	2,19E+0	49,92	1,09E-1	1,02E-5	2,55E-7	0,99842	4,34E-5
TV		64,07	103	2,55E+0	52,08	1,27E-1	6,20E-6	1,80E-7	0,99936	1,55E-5
l1	0	64,07	113,2	3,77E+0	51,22	4,76E-1	7,59E-6	7,79E-7	0,99918	1,07E-4
SAR	0	64,07	122,8	2,86E+0	52,27	7,84E-2	5,93E-6	1,07E-7	0,99938	1,07E-5
l1SAR	0,85	64,07	104,4	5,48E-1	52,22	8,80E-2	6,00E-6	1,22E-7	0,99939	1,24E-5
TVSAR	0,85	64,07	105,6	1,34E+0	52,18	1,53E-1	6,06E-6	2,16E-7	0,99937	1,87E-5

Tabela A.42 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR entre os testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original *lena*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	2	0,00E+0	28,62	2,33E-2	1,38E-3	7,39E-6	0,87838	1,13E-3
II	0	25,07	2	0,00E+0	28,60	3,58E-2	1,38E-3	1,14E-5	0,88087	9,28E-4
SAR	0	25,07	17,2	3,19E+0	27,89	1,84E-2	1,63E-3	6,90E-6	0,84609	1,14E-3
II SAR	0,85	25,07	2,4	5,48E-1	28,43	2,39E-2	1,44E-3	7,94E-6	0,86672	1,22E-2
TV SAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	28,50	2,39E-2	1,41E-3	7,79E-6	0,87350	1,21E-3
TV	0	29,07	3	0,00E+0	30,69	2,85E-2	8,54E-4	5,61E-6	0,91465	1,29E-3
II	0	29,07	3	0,00E+0	30,72	4,38E-2	8,47E-4	8,53E-6	0,91383	1,25E-3
SAR	0	29,07	3	0,00E+0	29,75	2,84E-2	1,06E-3	6,93E-6	0,89983	1,39E-3
II SAR	0,85	29,07	3	0,00E+0	30,56	5,18E-2	8,78E-4	1,05E-5	0,91409	1,24E-3
TV SAR	0,85	29,07	3	0,00E+0	30,53	3,10E-2	8,85E-4	6,32E-6	0,91256	1,35E-3
TV	0	34,07	7,8	4,47E-1	33,70	9,11E-2	4,27E-4	8,86E-6	0,95854	8,68E-4
II	0	34,07	18,4	3,36E+0	33,53	7,75E-2	4,44E-4	7,85E-6	0,95636	9,75E-4
SAR	0	34,07	19,2	4,47E-1	31,36	1,49E-2	7,32E-4	2,51E-6	0,94204	5,55E-4
II SAR	0,85	34,07	25,4	5,48E-1	33,60	8,45E-2	4,36E-4	8,41E-6	0,95600	9,96E-4
TV SAR	0,85	34,07	24	0,00E+0	33,53	7,53E-2	4,44E-4	7,61E-6	0,95556	9,94E-4
TV	0	39,07	22,4	1,34E+0	36,64	4,23E-2	2,17E-4	2,11E-6	0,97862	2,36E-4
II	0	39,07	46,2	2,09E+1	36,67	8,61E-2	2,15E-4	4,29E-6	0,97843	4,85E-4
SAR	0	39,07	1	0,00E+0	35,03	1,61E-2	3,14E-4	1,16E-6	0,96162	5,96E-4
II SAR	0,85	39,07	43,4	5,48E-1	36,86	4,63E-2	2,06E-4	2,20E-6	0,97841	3,24E-4
TV SAR	0,85	39,07	43	0,00E+0	36,70	3,18E-2	2,14E-4	1,57E-6	0,97776	2,81E-4
TV	0	44,07	33,8	8,37E-1	40,36	9,47E-2	9,22E-5	1,99E-6	0,98933	9,76E-5
II	0	44,07	65	1,84E+1	40,61	1,78E-1	8,70E-5	3,53E-6	0,98855	4,45E-4
SAR	0	44,07	91,8	1,30E+0	38,15	5,20E-2	1,53E-4	1,84E-6	0,98331	2,88E-4
II SAR	0,85	44,07	61,2	8,90E+0	40,77	1,28E-1	8,38E-5	2,45E-6	0,98866	2,80E-4
TV SAR	0,85	44,07	40,6	3,13E+0	40,50	9,90E-2	8,91E-5	2,02E-6	0,98865	1,37E-4
TV	0	49,07	59,6	1,26E+1	44,88	1,61E-1	3,25E-5	1,21E-6	0,99474	3,69E-4
II	0	49,07	76,2	1,45E+1	45,29	1,76E-1	2,96E-5	1,22E-6	0,99499	2,06E-4
SAR	0	49,07	97,2	4,47E-1	43,79	8,52E-2	4,18E-5	8,15E-7	0,99331	2,65E-4
II SAR	0,85	49,07	63,2	1,09E+1	45,37	8,58E-2	2,91E-5	5,76E-7	0,99506	2,03E-4
TV SAR	0,85	49,07	59,8	9,83E+0	44,97	1,33E-1	3,19E-5	9,75E-7	0,99467	2,36E-4
TV	0	54,07	85,8	1,08E+1	49,94	1,77E-1	1,01E-5	4,09E-7	0,99845	4,77E-5
II	0	54,07	97,8	2,26E+1	49,81	5,25E-1	1,05E-5	1,25E-6	0,99846	1,49E-4
SAR	0	54,07	114,2	2,59E+0	49,61	1,36E-1	1,09E-5	3,43E-7	0,99824	5,22E-5
II SAR	0,85	54,07	81	1,18E+1	50,21	1,48E-1	9,53E-6	3,24E-7	0,99854	5,00E-5
TV SAR	0,85	54,07	79,2	7,40E+0	49,95	1,21E-1	1,01E-5	2,79E-7	0,99845	5,54E-5
TV	0	64,07	95,4	2,88E+0	52,08	1,24E-1	6,19E-6	1,76E-7	0,99936	1,57E-5
II	0	64,07	110,4	9,84E+0	51,22	4,78E-1	7,58E-6	7,82E-7	0,99918	1,06E-4
SAR	0	64,07	122,8	2,86E+0	52,27	7,84E-2	5,93E-6	1,07E-7	0,99938	1,07E-5
II SAR	0,85	64,07	94,4	3,21E+0	52,23	8,80E-2	5,99E-6	1,22E-7	0,99939	1,25E-5
TV SAR	0,85	64,07	94	4,12E+0	52,18	1,48E-1	6,05E-6	2,08E-7	0,99937	1,88E-5

Tabela A.43 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM dos testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original *lena*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	2	0,00E+0	28,62	2,33E-2	1,38E-3	7,39E-6	0,87838	1,13E-3
li	0	25,07	2	0,00E+0	28,60	3,58E-2	1,38E-3	1,14E-5	0,88087	9,28E-4
SAR	0	25,07	27,8	4,47E-1	27,88	1,83E-2	1,63E-3	6,86E-6	0,84707	1,53E-3
liSAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	28,42	2,81E-2	1,44E-3	9,33E-6	0,87611	9,66E-4
TVSAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	28,50	2,39E-2	1,41E-3	7,79E-6	0,87350	1,21E-3
TV	0	29,07	2	0,00E+0	30,39	1,61E-2	9,15E-4	3,40E-6	0,92603	4,86E-4
li	0	29,07	2	0,00E+0	30,09	6,05E-2	9,79E-4	1,36E-5	0,92259	8,21E-4
SAR	0	29,07	17	0,00E+0	29,55	2,14E-2	1,11E-3	5,45E-6	0,90743	1,14E-3
liSAR	0,85	29,07	2	0,00E+0	29,83	7,60E-2	1,04E-3	1,82E-5	0,91964	1,02E-3
TVSAR	0,85	29,07	2	0,00E+0	30,22	1,87E-2	9,50E-4	4,10E-6	0,92387	6,02E-4
TV	0	34,07	6	0,00E+0	33,66	7,90E-2	4,30E-4	7,75E-6	0,95904	8,24E-4
li	0	34,07	5,6	8,94E-1	33,31	8,69E-2	4,67E-4	9,23E-6	0,95816	8,09E-4
SAR	0	34,07	19,2	4,47E-1	31,36	1,49E-2	7,32E-4	2,51E-6	0,94204	5,55E-4
liSAR	0,85	34,07	8,2	8,37E-1	33,39	8,16E-2	4,58E-4	8,53E-6	0,95672	8,59E-4
TVSAR	0,85	34,07	7,2	4,47E-1	33,33	9,15E-2	4,64E-4	9,65E-6	0,95657	7,85E-4
TV	0	39,07	15	0,00E+0	36,52	3,54E-2	2,23E-4	1,81E-6	0,97956	1,87E-4
li	0	39,07	29,4	2,18E+1	36,49	1,64E-1	2,24E-4	8,40E-6	0,97914	6,18E-4
SAR	0	39,07	48	7,07E-1	33,60	2,13E-2	4,36E-4	2,14E-6	0,96294	1,48E-4
liSAR	0,85	39,07	18,8	4,47E-1	36,64	4,27E-2	2,17E-4	2,13E-6	0,97911	2,38E-4
TVSAR	0,85	39,07	17,2	4,47E-1	36,46	1,01E-2	2,26E-4	5,28E-7	0,97862	2,08E-4
TV	0	44,07	26,4	5,48E-1	40,07	1,12E-1	9,83E-5	2,53E-6	0,99016	1,43E-4
li	0	44,07	33,6	6,69E+0	40,10	2,47E-1	9,78E-5	5,59E-6	0,98991	5,18E-4
SAR	0	44,07	91,8	1,30E+0	38,15	5,20E-2	1,53E-4	1,84E-6	0,98331	2,88E-4
liSAR	0,85	44,07	30	0,00E+0	40,34	7,06E-2	9,24E-5	1,50E-6	0,99015	1,61E-4
TVSAR	0,85	44,07	28	0,00E+0	40,14	5,84E-2	9,68E-5	1,30E-6	0,99001	1,58E-4
TV	0	49,07	35,8	8,37E-1	44,35	1,41E-1	3,67E-5	1,20E-6	0,99588	1,75E-5
li	0	49,07	42,6	2,88E+0	44,43	3,38E-1	3,61E-5	2,80E-6	0,99574	1,99E-4
SAR	0	49,07	64,8	1,10E+0	43,13	1,26E-1	4,87E-5	1,43E-6	0,99368	1,73E-4
liSAR	0,85	49,07	39,2	4,47E-1	44,76	7,46E-2	3,35E-5	5,73E-7	0,99595	3,26E-5
TVSAR	0,85	49,07	37	0,00E+0	44,42	4,62E-2	3,61E-5	3,84E-7	0,99583	4,35E-5
TV	0	54,07	74	4,95E+0	49,87	1,92E-1	1,03E-5	4,52E-7	0,99847	4,72E-5
li	0	54,07	85,8	2,61E+1	49,74	5,02E-1	1,07E-5	1,23E-6	0,99847	1,46E-4
SAR	0	54,07	114,2	2,59E+0	49,61	1,36E-1	1,09E-5	3,43E-7	0,99824	5,22E-5
liSAR	0,85	54,07	67	3,67E+0	50,09	1,42E-1	9,81E-6	3,20E-7	0,99856	4,57E-5
TVSAR	0,85	54,07	67,4	3,29E+0	49,82	1,44E-1	1,04E-5	3,41E-7	0,99847	4,71E-5
TV	0	64,07	103	2,55E+0	52,08	1,27E-1	6,20E-6	1,80E-7	0,99936	1,55E-5
li	0	64,07	113,2	3,77E+0	51,22	4,76E-1	7,59E-6	7,79E-7	0,99918	1,07E-4
SAR	0	64,07	122,8	2,86E+0	52,27	7,84E-2	5,93E-6	1,07E-7	0,99938	1,07E-5
liSAR	0,85	64,07	103,4	2,51E+0	52,22	8,86E-2	6,00E-6	1,23E-7	0,99939	1,24E-5
TVSAR	0,85	64,07	101,8	3,56E+0	52,18	1,49E-1	6,06E-6	2,10E-7	0,99937	1,86E-5

Tabela A.44 – Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência PSNR, a partir da imagem HR original *lena*

Método SR	λ	SNR (dB)	Média		Desvio Padrão	SNR (dB)	Média		Desvio Padrão	SNR (dB)	Média		Desvio Padrão
			Média	Desvio Padrão			Média	Desvio Padrão			Média	Desvio Padrão	
TV	0	25,07	54,84	1,63E+0	34,07	82,54	4,38E+0	44,07	251,07	1,06E+1	54,07	333,00	1,20E+1
li	0	25,07	58,15	1,71E+0	34,07	108,84	4,04E+0	44,07	286,57	5,77E+1	54,07	377,55	5,93E+1
SAR	0	25,07	76,33	4,24E+0	34,07	56,99	3,18E+0	44,07	298,09	1,59E+1	54,07	354,92	1,33E+1
liSAR	0,85	25,07	52,64	2,28E+0	34,07	80,15	7,12E+0	44,07	251,82	1,20E+1	54,07	331,00	1,28E+1
TVSAR	0,85	25,07	50,20	2,03E+0	34,07	69,56	3,36E+0	44,07	237,98	2,41E+1	54,07	316,25	1,58E+1
TV	0	29,07	59,38	6,00E+0	39,07	131,00	6,22E+0	49,07	301,43	1,46E+1	64,07	334,92	1,95E+1
li	0	29,07	67,35	3,74E+0	39,07	194,99	6,66E+1	49,07	333,34	1,99E+1	64,07	374,46	1,72E+1
SAR	0	29,07	50,41	2,22E+0	39,07	135,14	5,02E+0	49,07	310,68	1,40E+1	64,07	371,00	1,68E+1
liSAR	0,85	29,07	37,76	2,27E+0	39,07	134,31	6,11E+0	49,07	295,47	1,45E+1	64,07	334,85	1,24E+1
TVSAR	0,85	29,07	34,58	1,42E+0	39,07	123,17	5,75E+0	49,07	285,23	1,19E+1	64,07	332,67	1,65E+1

Tabela A.45 – Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original *lena*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	12	0,00E+0	26,62	3,92E-2	2,18E-3	1,96E-5	0,76060	2,11E-3
II	0	25,07	13	0,00E+0	26,44	4,82E-2	2,27E-3	2,51E-5	0,75338	2,25E-3
SAR	0	25,07	19	0,00E+0	27,87	2,12E-2	1,63E-3	7,94E-6	0,84547	1,03E-3
II SAR	0,85	25,07	13	0,00E+0	27,06	3,86E-2	1,97E-3	1,75E-5	0,77727	2,19E-3
TV SAR	0,85	25,07	12	0,00E+0	27,12	3,60E-2	1,94E-3	1,61E-5	0,78085	2,10E-3
TV	0	29,07	10	0,00E+0	30,30	3,76E-2	9,33E-4	8,10E-6	0,89547	8,19E-4
II	0	29,07	11	0,00E+0	30,14	4,27E-2	9,68E-4	9,54E-6	0,89310	1,06E-3
SAR	0	29,07	13	0,00E+0	29,56	1,73E-2	1,11E-3	4,41E-6	0,90703	1,07E-3
II SAR	0,85	29,07	9	0,00E+0	30,50	2,95E-2	8,91E-4	6,07E-6	0,90077	1,01E-3
TV SAR	0,85	29,07	8	0,00E+0	30,45	2,88E-2	9,02E-4	6,01E-6	0,90109	9,37E-4
TV	0	34,07	18,4	5,48E-1	33,59	5,87E-2	4,38E-4	5,91E-6	0,95555	6,92E-4
II	0	34,07	20,4	1,52E+0	33,21	7,00E-1	4,83E-4	8,61E-5	0,95473	2,45E-3
SAR	0	34,07	14,6	5,48E-1	31,34	1,72E-2	7,35E-4	2,92E-6	0,94173	3,45E-4
II SAR	0,85	34,07	17,6	5,48E-1	33,55	4,78E-2	4,42E-4	4,87E-6	0,95572	5,18E-4
TV SAR	0,85	34,07	16,6	5,48E-1	33,49	4,43E-2	4,48E-4	4,55E-6	0,95526	6,23E-4
TV	0	39,07	32,2	4,47E-1	36,54	3,76E-2	2,22E-4	1,92E-6	0,97751	1,40E-4
II	0	39,07	35	2,83E+0	36,61	7,16E-2	2,18E-4	3,59E-6	0,97812	3,09E-4
SAR	0	39,07	29,8	4,47E-1	33,53	1,78E-2	4,44E-4	1,82E-6	0,96262	1,09E-4
II SAR	0,85	39,07	30,6	5,48E-1	36,81	3,94E-2	2,09E-4	1,88E-6	0,97827	1,59E-4
TV SAR	0,85	39,07	30,6	5,48E-1	36,66	3,23E-2	2,16E-4	1,61E-6	0,97771	1,11E-4
TV	0	44,07	52,2	8,37E-1	40,29	8,44E-2	9,35E-5	1,81E-6	0,98764	3,08E-4
II	0	44,07	56,2	3,56E+0	40,71	5,95E-2	8,50E-5	1,17E-6	0,98889	2,09E-4
SAR	0	44,07	66,8	4,47E-1	37,97	5,99E-2	1,59E-4	2,22E-6	0,98316	3,10E-4
II SAR	0,85	44,07	51	7,07E-1	40,82	7,19E-2	8,28E-5	1,36E-6	0,98904	1,99E-4
TV SAR	0,85	44,07	51,2	4,47E-1	40,52	7,40E-2	8,88E-5	1,51E-6	0,98807	2,67E-4
TV	0	49,07	64,8	1,48E+0	44,84	2,27E-1	3,28E-5	1,71E-6	0,99451	1,83E-4
II	0	49,07	76,4	1,52E+1	45,19	1,81E-1	3,03E-5	1,27E-6	0,99505	1,57E-4
SAR	0	49,07	78,6	5,48E-1	43,69	1,42E-1	4,28E-5	1,40E-6	0,99347	1,05E-4
II SAR	0,85	49,07	63,2	8,37E-1	45,31	2,23E-1	2,95E-5	1,51E-6	0,99500	1,77E-4
TV SAR	0,85	49,07	63,2	8,37E-1	44,94	2,41E-1	3,21E-5	1,77E-6	0,99452	1,80E-4
TV	0	54,07	66,8	1,10E+0	49,58	1,99E-1	1,10E-5	4,93E-7	0,99845	4,25E-5
II	0	54,07	67,6	2,79E+0	49,93	2,54E-1	1,02E-5	5,82E-7	0,99856	5,21E-5
SAR	0	54,07	85,4	8,94E-1	49,18	1,66E-1	1,21E-5	4,60E-7	0,99822	4,56E-5
II SAR	0,85	54,07	65,8	1,64E+0	49,95	2,43E-1	1,01E-5	5,59E-7	0,99855	5,06E-5
TV SAR	0,85	54,07	65,8	1,30E+0	49,68	2,03E-1	1,08E-5	4,93E-7	0,99846	4,00E-5
TV	0	64,07	64,6	5,48E-1	51,15	1,09E-1	7,67E-6	1,94E-7	0,99921	1,71E-5
II	0	64,07	79,6	7,54E+0	50,33	1,63E-1	9,26E-6	3,57E-7	0,99902	5,20E-6
SAR	0	64,07	88	7,07E-1	51,67	1,15E-1	6,82E-6	1,80E-7	0,99928	1,92E-5
II SAR	0,85	64,07	65,6	1,67E+0	51,86	1,64E-1	6,51E-6	2,48E-7	0,99932	2,41E-5
TV SAR	0,85	64,07	65,8	1,64E+0	51,68	9,47E-2	6,79E-6	1,50E-7	0,99929	1,55E-5

Tabela A.46 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR entre os testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original *lena*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	2	0,00E+0	28,61	3,24E-2	1,38E-3	1,03E-5	0,87801	1,25E-3
l1	0	25,07	2	0,00E+0	28,60	4,14E-2	1,38E-3	1,32E-5	0,88048	1,32E-3
SAR	0	25,07	17,4	2,19E+0	27,87	2,12E-2	1,63E-3	7,96E-6	0,84509	1,20E-3
l1SAR	0,85	25,07	2,4	5,48E-1	28,42	3,16E-2	1,44E-3	1,05E-5	0,86546	1,47E-2
TVSAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	28,49	2,68E-2	1,42E-3	8,74E-6	0,87297	1,19E-3
TV	0	29,07	3	0,00E+0	30,70	3,27E-2	8,51E-4	6,43E-6	0,91445	1,02E-3
l1	0	29,07	3	0,00E+0	30,74	3,18E-2	8,42E-4	6,18E-6	0,91366	1,15E-3
SAR	0	29,07	3	0,00E+0	29,74	1,81E-2	1,06E-3	4,43E-6	0,89954	1,11E-3
l1SAR	0,85	29,07	3	0,00E+0	30,61	2,99E-2	8,70E-4	6,00E-6	0,91385	1,12E-3
TVSAR	0,85	29,07	3	0,00E+0	30,53	2,69E-2	8,85E-4	5,48E-6	0,91227	1,05E-3
TV	0	34,07	8	0,00E+0	33,68	4,54E-2	4,29E-4	4,46E-6	0,95813	4,84E-4
l1	0	34,07	16,6	6,58E+0	33,29	5,36E-1	4,72E-4	6,31E-5	0,95543	1,14E-3
SAR	0	34,07	14,6	5,48E-1	31,34	1,72E-2	7,35E-4	2,92E-6	0,94173	3,45E-4
l1SAR	0,85	34,07	17,6	5,48E-1	33,55	4,78E-2	4,42E-4	4,87E-6	0,95572	5,18E-4
TVSAR	0,85	34,07	16,6	5,48E-1	33,49	4,43E-2	4,48E-4	4,55E-6	0,95526	6,23E-4
TV	0	39,07	21,2	1,30E+0	36,58	2,91E-2	2,20E-4	1,47E-6	0,97857	2,32E-4
l1	0	39,07	33,2	5,40E+0	36,61	6,97E-2	2,18E-4	3,50E-6	0,97822	2,79E-4
SAR	0	39,07	1	0,00E+0	35,01	8,78E-3	3,15E-4	6,38E-7	0,96129	1,15E-4
l1SAR	0,85	39,07	30,6	5,48E-1	36,81	3,94E-2	2,09E-4	1,88E-6	0,97827	1,59E-4
TVSAR	0,85	39,07	30,6	5,48E-1	36,66	3,23E-2	2,16E-4	1,61E-6	0,97771	1,11E-4
TV	0	44,07	34,6	5,48E-1	40,40	8,03E-2	9,13E-5	1,69E-6	0,98940	2,04E-4
l1	0	44,07	56,2	3,56E+0	40,71	5,95E-2	8,50E-5	1,17E-6	0,98889	2,09E-4
SAR	0	44,07	66,8	4,47E-1	37,97	5,99E-2	1,59E-4	2,22E-6	0,98316	3,10E-4
l1SAR	0,85	44,07	51	7,07E-1	40,82	7,19E-2	8,28E-5	1,36E-6	0,98904	1,99E-4
TVSAR	0,85	44,07	41	1,22E+0	40,54	6,49E-2	8,84E-5	1,32E-6	0,98877	2,68E-4
TV	0	49,07	64	3,00E+0	44,84	2,25E-1	3,28E-5	1,69E-6	0,99454	1,64E-4
l1	0	49,07	75,8	1,60E+1	45,19	1,81E-1	3,03E-5	1,27E-6	0,99507	1,57E-4
SAR	0	49,07	78,6	5,48E-1	43,69	1,42E-1	4,28E-5	1,40E-6	0,99347	1,05E-4
l1SAR	0,85	49,07	60,2	1,92E+0	45,32	2,22E-1	2,94E-5	1,50E-6	0,99507	2,00E-4
TVSAR	0,85	49,07	58,6	5,90E+0	44,95	2,41E-1	3,21E-5	1,77E-6	0,99469	2,15E-4
TV	0	54,07	66,8	1,10E+0	49,58	1,99E-1	1,10E-5	4,93E-7	0,99845	4,25E-5
l1	0	54,07	67,6	2,79E+0	49,93	2,54E-1	1,02E-5	5,82E-7	0,99856	5,21E-5
SAR	0	54,07	85,4	8,94E-1	49,18	1,66E-1	1,21E-5	4,60E-7	0,99822	4,56E-5
l1SAR	0,85	54,07	65,8	1,64E+0	49,95	2,43E-1	1,01E-5	5,59E-7	0,99855	5,06E-5
TVSAR	0,85	54,07	65,8	1,30E+0	49,68	2,03E-1	1,08E-5	4,93E-7	0,99846	4,00E-5
TV	0	64,07	64,6	5,48E-1	51,15	1,09E-1	7,67E-6	1,94E-7	0,99921	1,71E-5
l1	0	64,07	79,6	7,54E+0	50,33	1,63E-1	9,26E-6	3,57E-7	0,99902	5,20E-6
SAR	0	64,07	88	7,07E-1	51,67	1,15E-1	6,82E-6	1,80E-7	0,99928	1,92E-5
l1SAR	0,85	64,07	65,6	1,67E+0	51,86	1,64E-1	6,51E-6	2,48E-7	0,99932	2,41E-5
TVSAR	0,85	64,07	65,8	1,64E+0	51,68	9,47E-2	6,79E-6	1,50E-7	0,99929	1,55E-5

Tabela A.47 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM entre os testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original *lena*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	2	0,00E+0	28,61	3,24E-2	1,38E-3	1,03E-5	0,87801	1,25E-3
II	0	25,07	2	0,00E+0	28,60	4,14E-2	1,38E-3	1,32E-5	0,88048	1,32E-3
SAR	0	25,07	19	0,00E+0	27,87	2,12E-2	1,63E-3	7,94E-6	0,84547	1,03E-3
II SAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	28,41	3,23E-2	1,44E-3	1,07E-5	0,87557	1,27E-3
TV SAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	28,49	2,68E-2	1,42E-3	8,74E-6	0,87297	1,19E-3
TV	0	29,07	2	0,00E+0	30,40	2,08E-2	9,12E-4	4,39E-6	0,92584	5,67E-4
II	0	29,07	2	0,00E+0	30,16	4,12E-2	9,63E-4	9,13E-6	0,92295	7,89E-4
SAR	0	29,07	13	0,00E+0	29,56	1,73E-2	1,11E-3	4,41E-6	0,90703	1,07E-3
II SAR	0,85	29,07	2	0,00E+0	29,92	5,21E-2	1,02E-3	1,22E-5	0,92017	8,46E-4
TV SAR	0,85	29,07	2	0,00E+0	30,23	1,85E-2	9,49E-4	4,05E-6	0,92363	6,52E-4
TV	0	34,07	6	0,00E+0	33,64	4,08E-2	4,33E-4	4,05E-6	0,95872	4,36E-4
II	0	34,07	5,8	1,10E+0	33,09	4,30E-1	4,93E-4	5,19E-5	0,95694	1,84E-3
SAR	0	34,07	14,6	5,48E-1	31,34	1,72E-2	7,35E-4	2,92E-6	0,94173	3,45E-4
II SAR	0,85	34,07	8,4	8,94E-1	33,35	4,76E-2	4,62E-4	5,06E-6	0,95633	3,52E-4
TV SAR	0,85	34,07	7	0,00E+0	33,29	3,70E-2	4,69E-4	3,97E-6	0,95623	4,73E-4
TV	0	39,07	14,8	4,47E-1	36,47	3,57E-2	2,26E-4	1,86E-6	0,97943	1,04E-4
II	0	39,07	18,6	3,58E+0	36,39	6,00E-2	2,30E-4	3,17E-6	0,97918	4,79E-4
SAR	0	39,07	29,8	4,47E-1	33,53	1,78E-2	4,44E-4	1,82E-6	0,96262	1,09E-4
II SAR	0,85	39,07	17,8	4,47E-1	36,58	2,67E-2	2,20E-4	1,35E-6	0,97895	1,42E-4
TV SAR	0,85	39,07	17	0,00E+0	36,44	2,53E-2	2,27E-4	1,32E-6	0,97852	1,08E-4
TV	0	44,07	27	0,00E+0	40,14	7,87E-2	9,68E-5	1,75E-6	0,99028	1,62E-4
II	0	44,07	31,6	2,70E+0	40,23	6,21E-2	9,48E-5	1,35E-6	0,99023	1,92E-4
SAR	0	44,07	66,8	4,47E-1	37,97	5,99E-2	1,59E-4	2,22E-6	0,98316	3,10E-4
II SAR	0,85	44,07	29,8	4,47E-1	40,37	5,62E-2	9,19E-5	1,18E-6	0,99030	1,30E-4
TV SAR	0,85	44,07	27,8	4,47E-1	40,14	8,46E-2	9,68E-5	1,90E-6	0,99011	1,65E-4
TV	0	49,07	35,8	4,47E-1	44,31	1,56E-1	3,70E-5	1,33E-6	0,99587	8,39E-5
II	0	49,07	52,2	1,64E+1	44,44	2,40E-1	3,61E-5	2,02E-6	0,99562	2,97E-4
SAR	0	49,07	64,8	8,37E-1	43,12	1,53E-1	4,88E-5	1,72E-6	0,99370	6,07E-5
II SAR	0,85	49,07	39,4	5,48E-1	44,73	2,02E-1	3,36E-5	1,56E-6	0,99596	9,70E-5
TV SAR	0,85	49,07	37,2	4,47E-1	44,41	2,02E-1	3,62E-5	1,69E-6	0,99583	9,91E-5
TV	0	54,07	66,6	8,94E-1	49,57	1,88E-1	1,10E-5	4,67E-7	0,99845	4,25E-5
II	0	54,07	67,4	2,61E+0	49,93	2,53E-1	1,02E-5	5,79E-7	0,99856	5,21E-5
SAR	0	54,07	85,4	8,94E-1	49,18	1,66E-1	1,21E-5	4,60E-7	0,99822	4,56E-5
II SAR	0,85	54,07	64,6	1,14E+0	49,91	2,30E-1	1,02E-5	5,33E-7	0,99855	5,25E-5
TV SAR	0,85	54,07	65,6	1,14E+0	49,68	2,04E-1	1,08E-5	4,96E-7	0,99846	3,99E-5
TV	0	64,07	64,6	5,48E-1	51,15	1,09E-1	7,67E-6	1,94E-7	0,99921	1,71E-5
II	0	64,07	79,6	7,54E+0	50,33	1,63E-1	9,26E-6	3,57E-7	0,99902	5,20E-6
SAR	0	64,07	88	7,07E-1	51,67	1,15E-1	6,82E-6	1,80E-7	0,99928	1,92E-5
II SAR	0,85	64,07	65,6	1,67E+0	51,86	1,64E-1	6,51E-6	2,48E-7	0,99932	2,41E-5
TV SAR	0,85	64,07	65,8	1,64E+0	51,68	9,47E-2	6,79E-6	1,50E-7	0,99929	1,55E-5

Tabela A.48 – Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência SSIM, a partir da imagem HR original *lena*

Método	λ	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	37,86	1,24E+0	34,07	55,11	1,38E+0	44,07	184,27	6,88E+0	54,07	238,16	1,52E+1
II	0	25,07	39,76	1,91E+0	34,07	69,09	7,60E+0	44,07	208,40	1,85E+1	54,07	247,65	1,85E+1
SAR	0	25,07	53,64	2,26E+0	34,07	44,10	8,05E-1	44,07	226,78	7,04E+0	54,07	279,56	9,13E+0
II SAR	0,85	25,07	39,22	9,00E-1	34,07	59,45	6,05E+0	44,07	189,92	1,23E+1	54,07	230,71	1,19E+1
TV SAR	0,85	25,07	36,13	1,10E+0	34,07	49,45	1,33E+0	44,07	180,67	7,19E+0	54,07	224,72	8,80E+0
TV	0	29,07	31,69	8,97E-1	39,07	94,04	3,93E+0	49,07	233,59	1,18E+1	64,07	231,48	1,57E+1
II	0	29,07	35,75	7,76E-1	39,07	116,52	1,27E+1	49,07	287,59	5,51E+1	64,07	298,92	4,08E+1
SAR	0	29,07	39,76	1,05E+0	39,07	85,23	2,65E+0	49,07	266,52	1,38E+1	64,07	288,77	1,81E+1
II SAR	0,85	29,07	28,76	8,59E-1	39,07	98,49	4,76E+0	49,07	232,95	1,35E+1	64,07	233,81	1,13E+1
TV SAR	0,85	29,07	26,06	6,73E-1	39,07	88,10	3,11E+0	49,07	223,69	9,05E+0	64,07	229,06	1,01E+1

Tabela A.49 – Resultados da última iteração entre os testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original *boats*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV		25,07	17,4	2,51E+0	26,56	3,27E-2	2,21E-3	1,66E-5	0,70498	1,04E-3
l1	0	25,07	18	2,24E+0	26,36	1,14E-1	2,31E-3	6,14E-5	0,69706	2,59E-3
SAR	0	25,07	30,8	4,92E+0	28,51	1,84E-2	1,41E-3	5,97E-6	0,81801	8,82E-4
l1SAR	0,85	25,07	18,8	2,68E+0	27,08	3,10E-2	1,96E-3	1,40E-5	0,72535	9,15E-4
TVSAR	0,85	25,07	18	2,24E+0	27,14	2,92E-2	1,93E-3	1,29E-5	0,72890	8,34E-4
TV		29,07	13,8	2,68E+0	30,58	2,94E-2	8,75E-4	5,92E-6	0,86581	2,95E-4
l1	0	29,07	17,6	3,71E+0	30,28	1,23E-1	9,38E-4	2,63E-5	0,86185	1,05E-3
SAR	0	29,07	18	2,24E+0	30,30	1,56E-2	9,33E-4	3,35E-6	0,88936	2,52E-4
l1SAR	0,85	29,07	11,8	1,64E+0	30,98	8,39E-2	7,98E-4	1,56E-5	0,87473	5,10E-4
TVSAR	0,85	29,07	11,2	1,79E+0	30,91	2,83E-2	8,12E-4	5,29E-6	0,87492	2,86E-4
TV		34,07	22,6	3,71E+0	34,24	2,07E-2	3,77E-4	1,80E-6	0,94339	3,03E-4
l1	0	34,07	35,2	1,36E+1	33,12	7,50E-1	4,93E-4	9,48E-5	0,94123	3,35E-3
SAR	0	34,07	15,2	1,79E+0	32,18	1,49E-2	6,06E-4	2,09E-6	0,93059	2,33E-4
l1SAR	0,85	34,07	20,8	1,10E+0	34,34	2,53E-1	3,69E-4	2,16E-5	0,94479	6,67E-4
TVSAR	0,85	34,07	18,8	2,68E+0	34,34	2,28E-2	3,68E-4	1,93E-6	0,94397	3,00E-4
TV		39,07	37,4	5,27E+0	37,58	2,12E-2	1,75E-4	8,51E-7	0,97197	1,73E-4
l1	0	39,07	51,8	2,22E+1	36,29	2,38E+0	2,72E-4	1,95E-4	0,96870	9,60E-3
SAR	0	39,07	35,2	6,26E+0	34,64	4,33E-2	3,44E-4	3,45E-6	0,95587	2,08E-4
l1SAR	0,85	39,07	40,6	5,13E+0	38,20	2,60E-2	1,51E-4	9,08E-7	0,97354	1,06E-4
TVSAR	0,85	39,07	34,8	4,92E+0	38,08	2,95E-2	1,55E-4	1,06E-6	0,97269	1,29E-4
TV		44,07	77,4	1,51E+1	40,20	9,24E-2	9,55E-5	2,03E-6	0,98318	2,94E-4
l1	0	44,07	63	3,06E+1	37,24	4,56E+0	2,91E-4	2,78E-4	0,97250	1,64E-2
SAR	0	44,07	83	2,08E+1	39,88	1,52E-1	1,03E-4	3,59E-6	0,97941	4,51E-4
l1SAR	0,85	44,07	71,2	1,07E+1	41,56	5,16E-2	6,98E-5	8,28E-7	0,98553	2,31E-4
TVSAR	0,85	44,07	68,2	1,04E+1	41,26	4,29E-2	7,48E-5	7,37E-7	0,98468	2,43E-4
TV		49,07	88,6	1,39E+1	43,43	4,62E-2	4,54E-5	4,84E-7	0,99110	1,95E-4
l1	0	49,07	68	5,62E+1	36,57	6,41E+0	4,05E-4	3,30E-4	0,96784	2,18E-2
SAR	0	49,07	89,4	7,64E+0	44,70	4,07E-2	3,39E-5	3,18E-7	0,99210	1,64E-4
l1SAR	0,85	49,07	85	1,31E+1	44,33	4,55E-2	3,69E-5	3,87E-7	0,99225	2,25E-4
TVSAR	0,85	49,07	85,4	1,31E+1	44,02	4,86E-2	3,96E-5	4,44E-7	0,99163	2,21E-4
TV		54,07	98,6	1,72E+1	46,59	2,00E-1	2,19E-5	1,04E-6	0,99699	4,30E-5
l1	0	54,07	64,6	4,15E+1	38,18	7,95E+0	3,56E-4	3,06E-4	0,97231	2,27E-2
SAR	0	54,07	98	1,18E+1	47,52	2,59E-2	1,77E-5	1,05E-7	0,99726	4,46E-5
l1SAR	0,85	54,07	94,6	1,49E+1	47,21	7,28E-2	1,90E-5	3,20E-7	0,99727	4,46E-5
TVSAR	0,85	54,07	93,2	1,53E+1	47,01	1,13E-1	1,99E-5	5,26E-7	0,99712	2,39E-5
TV		64,07	93,4	1,62E+1	47,75	3,52E-1	1,68E-5	1,43E-6	0,99856	1,87E-4
l1	0	64,07	48,6	3,42E+1	35,15	7,19E+0	5,16E-4	2,82E-4	0,96161	2,08E-2
SAR	0	64,07	102,2	1,43E+1	48,62	5,66E-2	1,37E-5	1,79E-7	0,99876	6,20E-5
l1SAR	0,85	64,07	94,6	1,49E+1	48,36	1,12E-1	1,46E-5	3,82E-7	0,99875	7,15E-5
TVSAR	0,85	64,07	92,4	1,49E+1	48,18	2,08E-1	1,52E-5	7,46E-7	0,99865	1,16E-4

Tabela A.50 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR entre os testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original *boats*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	2	0,00E+0	29,00	1,64E-2	1,26E-3	4,75E-6	0,84904	5,97E-4
II	0	25,07	2	0,00E+0	28,99	4,97E-2	1,26E-3	1,45E-5	0,85168	5,72E-4
SAR	0	25,07	30,8	4,92E+0	28,51	1,84E-2	1,41E-3	5,97E-6	0,81801	8,82E-4
II SAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	28,91	1,55E-2	1,28E-3	4,57E-6	0,84793	5,28E-4
TV SAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	28,96	1,57E-2	1,27E-3	4,60E-6	0,84429	5,54E-4
TV	0	29,07	3	0,00E+0	31,07	2,77E-2	7,82E-4	4,98E-6	0,89229	1,42E-4
II	0	29,07	3	0,00E+0	31,01	8,61E-2	7,92E-4	1,56E-5	0,89028	5,72E-4
SAR	0	29,07	4	0,00E+0	30,49	1,75E-2	8,92E-4	3,59E-6	0,87710	3,63E-4
II SAR	0,85	29,07	3	0,00E+0	31,15	6,02E-2	7,68E-4	1,07E-5	0,89330	3,28E-4
TV SAR	0,85	29,07	3	0,00E+0	31,08	2,60E-2	7,81E-4	4,69E-6	0,89124	2,00E-4
TV	0	34,07	7	0,00E+0	34,32	2,15E-2	3,70E-4	1,83E-6	0,94518	2,59E-4
II	0	34,07	26	2,03E+1	33,27	5,71E-1	4,74E-4	6,78E-5	0,94183	2,97E-3
SAR	0	34,07	15,2	1,79E+0	32,18	1,49E-2	6,06E-4	2,09E-6	0,93059	2,33E-4
II SAR	0,85	34,07	20,8	1,10E+0	34,34	2,53E-1	3,69E-4	2,16E-5	0,94479	6,67E-4
TV SAR	0,85	34,07	18,8	2,68E+0	34,34	2,28E-2	3,68E-4	1,93E-6	0,94397	3,00E-4
TV	0	39,07	15,8	4,47E-1	37,74	2,56E-2	1,68E-4	9,92E-7	0,97355	1,02E-4
II	0	39,07	33,8	2,25E+1	36,42	2,12E+0	2,55E-4	1,59E-4	0,96858	1,05E-2
SAR	0	39,07	1	0,00E+0	36,38	2,96E-2	2,30E-4	1,57E-6	0,94756	4,94E-4
II SAR	0,85	39,07	40,6	5,13E+0	38,20	2,60E-2	1,51E-4	9,08E-7	0,97354	1,06E-4
TV SAR	0,85	39,07	34,8	4,92E+0	38,08	2,95E-2	1,55E-4	1,06E-6	0,97269	1,29E-4
TV	0	44,07	22,8	4,47E-1	40,80	2,77E-2	8,33E-5	5,31E-7	0,98625	1,13E-4
II	0	44,07	23,2	1,90E+1	37,61	4,44E+0	2,62E-4	2,46E-4	0,97239	1,93E-2
SAR	0	44,07	83	2,08E+1	39,88	1,52E-1	1,03E-4	3,59E-6	0,97941	4,51E-4
II SAR	0,85	44,07	29,4	2,30E+0	41,69	3,91E-2	6,78E-5	6,10E-7	0,98696	1,37E-4
TV SAR	0,85	44,07	25,8	4,47E-1	41,49	2,59E-2	7,10E-5	4,23E-7	0,98654	1,33E-4
TV	0	49,07	64,4	2,42E+1	43,46	5,93E-2	4,51E-5	6,14E-7	0,99185	9,89E-4
II	0	49,07	42	5,99E+1	37,05	6,21E+0	3,53E-4	2,85E-4	0,96684	2,34E-2
SAR	0	49,07	87	8,80E+0	44,70	4,06E-2	3,39E-5	3,17E-7	0,99211	1,57E-4
II SAR	0,85	49,07	42,4	5,48E-1	44,71	5,05E-2	3,38E-5	3,96E-7	0,99376	6,27E-5
TV SAR	0,85	49,07	37,6	5,48E-1	44,29	3,78E-2	3,72E-5	3,24E-7	0,99342	6,48E-5
TV	0	54,07	86,2	1,19E+1	46,61	2,06E-1	2,19E-5	1,07E-6	0,99702	4,95E-5
II	0	54,07	37,2	4,55E+1	38,46	7,73E+0	3,22E-4	2,75E-4	0,96997	2,49E-2
SAR	0	54,07	78,8	4,21E+0	47,56	2,07E-2	1,75E-5	8,34E-8	0,99732	2,73E-5
II SAR	0,85	54,07	77,4	5,37E+0	47,26	9,43E-2	1,88E-5	4,10E-7	0,99733	2,20E-5
TV SAR	0,85	54,07	83,2	1,00E+1	47,03	1,25E-1	1,98E-5	5,79E-7	0,99715	3,25E-5
TV	0	64,07	93	1,61E+1	47,75	3,52E-1	1,68E-5	1,43E-6	0,99856	1,87E-4
II	0	64,07	21,2	3,85E+1	35,63	6,93E+0	4,50E-4	2,44E-4	0,95963	2,19E-2
SAR	0	64,07	88,6	7,57E+0	48,62	5,78E-2	1,37E-5	1,83E-7	0,99875	5,67E-5
II SAR	0,85	64,07	78	5,61E+0	48,39	1,26E-1	1,45E-5	4,25E-7	0,99874	6,98E-5
TV SAR	0,85	64,07	84,4	1,11E+1	48,18	2,09E-1	1,52E-5	7,52E-7	0,99865	1,15E-4

Tabela A.51 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM entre os testes feitos com convergência baseada em MSE, a partir da imagem HR original *boats*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	2	0,00E+0	29,00	1,64E-2	1,26E-3	4,75E-6	0,84904	5,97E-4
l1	0	25,07	2	0,00E+0	28,99	4,97E-2	1,26E-3	1,45E-5	0,85168	5,72E-4
SAR	0	25,07	30,8	4,92E+0	28,51	1,84E-2	1,41E-3	5,97E-6	0,81801	8,82E-4
l1SAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	28,91	1,55E-2	1,28E-3	4,57E-6	0,84793	5,28E-4
TVSAR	0,85	25,07	2	0,00E+0	28,96	1,57E-2	1,27E-3	4,60E-6	0,84429	5,54E-4
TV	0	29,07	2	0,00E+0	30,90	2,62E-2	8,13E-4	4,92E-6	0,90598	3,51E-4
l1	0	29,07	2	0,00E+0	30,56	6,84E-2	8,78E-4	1,38E-5	0,90173	8,41E-4
SAR	0	29,07	18	2,24E+0	30,30	1,56E-2	9,33E-4	3,35E-6	0,88936	2,52E-4
l1SAR	0,85	29,07	2	0,00E+0	30,47	4,84E-2	8,98E-4	1,01E-5	0,90021	5,79E-4
TVSAR	0,85	29,07	2	0,00E+0	30,85	2,54E-2	8,22E-4	4,81E-6	0,90459	3,23E-4
TV	0	34,07	5	0,00E+0	34,26	2,00E-2	3,75E-4	1,73E-6	0,94543	2,48E-4
l1	0	34,07	13,4	1,15E+1	33,24	6,01E-1	4,78E-4	7,22E-5	0,94194	2,97E-3
SAR	0	34,07	15,2	1,79E+0	32,18	1,49E-2	6,06E-4	2,09E-6	0,93059	2,33E-4
l1SAR	0,85	34,07	10	5,61E+0	34,23	2,15E-1	3,78E-4	1,86E-5	0,94508	9,24E-4
TVSAR	0,85	34,07	7,2	4,47E-1	34,23	2,08E-2	3,78E-4	1,81E-6	0,94430	2,72E-4
TV	0	39,07	14	0,00E+0	37,72	2,42E-2	1,69E-4	9,44E-7	0,97369	8,89E-5
l1	0	39,07	27,6	1,71E+1	36,30	2,22E+0	2,66E-4	1,75E-4	0,96926	9,67E-3
SAR	0	39,07	35,2	6,26E+0	34,64	4,33E-2	3,44E-4	3,45E-6	0,95587	2,08E-4
l1SAR	0,85	39,07	22,2	1,79E+0	38,07	2,09E-2	1,56E-4	7,50E-7	0,97379	7,95E-5
TVSAR	0,85	39,07	17	0,00E+0	37,97	2,46E-2	1,60E-4	9,04E-7	0,97310	9,94E-5
TV	0	44,07	22,6	5,48E-1	40,79	2,86E-2	8,33E-5	5,49E-7	0,98625	1,09E-4
l1	0	44,07	29,2	8,04E+0	37,39	4,68E+0	2,88E-4	2,81E-4	0,97379	1,76E-2
SAR	0	44,07	83	2,08E+1	39,88	1,52E-1	1,03E-4	3,59E-6	0,97941	4,51E-4
l1SAR	0,85	44,07	27,6	2,51E+0	41,67	4,44E-2	6,81E-5	6,95E-7	0,98701	1,35E-4
TVSAR	0,85	44,07	24,4	5,48E-1	41,48	3,28E-2	7,12E-5	5,36E-7	0,98658	1,20E-4
TV	0	49,07	35,4	5,48E-1	43,41	5,31E-2	4,56E-5	5,55E-7	0,99300	5,63E-5
l1	0	49,07	37	3,42E+1	36,75	6,39E+0	3,88E-4	3,16E-4	0,96861	2,26E-2
SAR	0	49,07	62,4	8,94E-1	44,60	5,44E-2	3,47E-5	4,35E-7	0,99234	1,28E-4
l1SAR	0,85	49,07	41,2	4,47E-1	44,70	4,99E-2	3,39E-5	3,92E-7	0,99378	5,97E-5
TVSAR	0,85	49,07	36	0,00E+0	44,28	3,76E-2	3,73E-5	3,23E-7	0,99345	5,80E-5
TV	0	54,07	81,2	8,98E+0	46,60	2,01E-1	2,19E-5	1,05E-6	0,99704	5,69E-5
l1	0	54,07	50,8	2,70E+1	38,18	7,95E+0	3,55E-4	3,06E-4	0,97234	2,28E-2
SAR	0	54,07	76,8	1,48E+0	47,56	1,83E-2	1,75E-5	7,41E-8	0,99732	2,40E-5
l1SAR	0,85	54,07	66,4	2,07E+0	47,19	6,39E-2	1,91E-5	2,79E-7	0,99736	1,47E-5
TVSAR	0,85	54,07	73,8	7,22E+0	46,98	9,90E-2	2,01E-5	4,62E-7	0,99717	2,89E-5
TV	0	64,07	93,4	1,62E+1	47,75	3,52E-1	1,68E-5	1,43E-6	0,99856	1,87E-4
l1	0	64,07	37,8	3,64E+1	35,24	7,14E+0	5,02E-4	2,72E-4	0,96175	2,07E-2
SAR	0	64,07	102,2	1,43E+1	48,62	5,66E-2	1,37E-5	1,79E-7	0,99876	6,20E-5
l1SAR	0,85	64,07	84,8	9,42E+0	48,38	1,21E-1	1,45E-5	4,08E-7	0,99875	7,25E-5
TVSAR	0,85	64,07	90,4	1,40E+1	48,18	2,08E-1	1,52E-5	7,47E-7	0,99865	1,16E-4

Tabela A.52 – Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência PSNR, a partir da imagem HR original *boats*

Método SR	λ	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	204,00	3,21E+1	34,07	254,13	4,05E+1	44,07	929,36	1,82E+2	54,07	1218,41	2,20E+2
l1	0	25,07	207,32	2,65E+1	34,07	411,42	1,61E+2	44,07	767,36	3,79E+2	54,07	806,00	5,30E+2
SAR	0	25,07	336,00	5,57E+1	34,07	178,30	2,04E+1	44,07	910,86	2,47E+2	54,07	1187,98	1,45E+2
l1SAR	0,85	25,07	215,99	3,53E+1	34,07	248,71	2,29E+1	44,07	912,11	1,34E+2	54,07	1185,83	1,67E+2
TVSAR	0,85	25,07	206,19	3,24E+1	34,07	214,66	3,00E+1	44,07	847,39	1,30E+2	54,07	1152,43	1,86E+2
TV	0	29,07	165,49	3,33E+1	39,07	410,21	5,85E+1	49,07	1135,20	1,67E+2	64,07	1169,74	2,13E+2
l1	0	29,07	207,27	4,40E+1	39,07	628,17	2,71E+2	49,07	876,02	7,98E+2	64,07	601,43	4,82E+2
SAR	0	29,07	206,97	2,75E+1	39,07	374,02	6,12E+1	49,07	1122,88	9,19E+1	64,07	1238,44	1,69E+2
l1SAR	0,85	29,07	145,38	2,15E+1	39,07	478,78	4,62E+1	49,07	1114,39	1,66E+2	64,07	1217,85	1,67E+2
TVSAR	0,85	29,07	138,25	2,07E+1	39,07	372,09	5,01E+1	49,07	1085,99	1,59E+2	64,07	1166,99	1,64E+2

Tabela A.53 – Resultados da última iteração dos testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original *boats*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	13	0,00E+0	26,58	2,28E-2	2,20E-3	1,15E-5	0,70520	1,86E-3
II	0	25,07	14	0,00E+0	26,41	1,18E+1	2,28E-3	1,09E-5	0,69799	3,12E-1
SAR	0	25,07	29,3	1,57E+1	30,60	4,68E+0	1,29E+0	2,87E+0	0,65353	3,65E-1
II SAR	0,85	25,07	15,6	3,59E+0	29,47	5,28E+0	7,60E-1	1,69E+0	0,58044	3,24E-1
TVSAR	0,85	25,07	12,5	2,79E+0	28,43	2,82E+0	1,84E-2	3,68E-2	0,58326	3,26E-1
TV	0	29,07	14,1	9,71E+0	31,49	2,09E+0	1,43E+0	3,20E+0	0,69307	3,87E-1
II	0	29,07	8,9	4,72E+0	30,39	2,14E-1	3,79E-2	8,26E-2	0,69097	3,86E-1
SAR	0	29,07	14,4	8,57E-1	31,50	2,70E+0	4,55E-1	1,02E+0	0,71129	3,97E-1
II SAR	0,85	29,07	10,2	2,74E+0	32,75	4,01E+0	2,10E-2	4,52E-2	0,70012	3,91E-1
TVSAR	0,85	29,07	6,6	3,09E+0	31,58	1,57E+0	3,53E-2	7,70E-2	0,70028	3,91E-1
TV	0	34,07	13,5	5,56E+0	36,99	6,10E+0	2,00E-2	4,39E-2	0,75478	4,22E-1
II	0	34,07	17,6	1,06E+1	33,39	1,03E+0	2,54E-3	4,56E-3	0,75304	4,21E-1
SAR	0	34,07	9,7	5,12E+0	31,93	5,37E-1	1,59E-2	3,43E-2	0,74463	4,16E-1
II SAR	0,85	34,07	12,7	5,85E+0	37,08	6,24E+0	1,73E-2	3,78E-2	0,75585	4,23E-1
TVSAR	0,85	34,07	11,7	5,10E+0	37,17	6,28E+0	8,80E-3	1,89E-2	0,75526	4,22E-1
TV	0	39,07	23	1,12E+1	39,36	4,09E+0	9,67E-3	2,12E-2	0,77759	4,35E-1
II	0	39,07	18,2	8,91E+0	35,56	7,31E+0	1,03E-2	2,17E-2	0,76230	4,26E-1
SAR	0	39,07	19,2	1,07E+1	34,09	1,07E+0	2,20E-3	4,14E-3	0,76451	4,27E-1
II SAR	0,85	39,07	24,9	1,37E+1	37,39	1,76E+0	4,17E-3	8,97E-3	0,77894	4,35E-1
TVSAR	0,85	39,07	21,3	1,05E+1	38,71	1,44E+0	9,60E-3	2,11E-2	0,77819	4,35E-1
TV	0	44,07	43,6	2,38E+1	41,59	3,15E+0	1,18E-2	2,61E-2	0,78678	4,40E-1
II	0	44,07	37,8	2,59E+1	40,08	5,62E+0	8,21E-3	1,78E-2	0,78035	4,37E-1
SAR	0	44,07	45,1	2,33E+1	39,77	2,61E-1	1,32E-2	2,93E-2	0,78315	4,38E-1
II SAR	0,85	44,07	33,3	2,17E+1	39,80	3,94E+0	1,05E-2	2,31E-2	0,78205	4,37E-1
TVSAR	0,85	44,07	40,6	2,17E+1	40,68	1,38E+0	2,82E-3	6,14E-3	0,78801	4,40E-1
TV	0	49,07	53,6	3,00E+1	41,62	4,06E+0	4,09E-3	9,03E-3	0,79315	4,43E-1
II	0	49,07	19	1,06E+1	33,57	2,53E+0	5,48E-3	1,10E-2	0,76489	4,28E-1
SAR	0	49,07	59,4	3,27E+1	45,24	1,27E+0	5,14E-3	1,14E-2	0,79376	4,44E-1
II SAR	0,85	49,07	51,8	2,90E+1	41,23	7,11E+0	2,45E-3	5,39E-3	0,79428	4,43E-1
TVSAR	0,85	49,07	51,7	2,86E+1	42,74	2,89E+0	9,12E-3	2,03E-2	0,79352	4,43E-1
TV	0	54,07	53,2	2,97E+1	43,16	7,19E+0	2,72E-3	6,03E-3	0,79780	4,45E-1
II	0	54,07	16,8	8,47E+0	34,32	5,09E+0	9,72E-3	2,03E-2	0,76249	4,26E-1
SAR	0	54,07	63	3,35E+1	46,81	1,57E+0	6,79E-3	1,51E-2	0,79783	4,46E-1
II SAR	0,85	54,07	54,9	2,94E+1	46,66	1,31E+0	7,19E-3	1,60E-2	0,79793	4,46E-1
TVSAR	0,85	54,07	51,5	2,79E+1	46,43	9,79E-1	7,89E-3	1,76E-2	0,79775	4,46E-1
TV	0	64,07	52,6	2,94E+1	43,95	7,30E+0	4,02E-3	8,94E-3	0,79878	4,46E-1
II	0	64,07	19,4	1,09E+1	32,03	8,19E-1	4,40E-3	8,56E-3	0,76481	4,27E-1
SAR	0	64,07	61,7	3,42E+1	44,13	9,82E+0	6,31E-3	1,41E-2	0,79935	4,46E-1
II SAR	0,85	64,07	53,6	3,00E+1	43,87	9,35E+0	5,31E-3	1,18E-2	0,79923	4,46E-1
TVSAR	0,85	64,07	52,0	2,92E+1	43,60	9,24E+0	5,88E-3	1,31E-2	0,79911	4,46E-1

Tabela A.54 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior PSNR entre os testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original *boats*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	2	0,00E+0	29,02	2,09E-2	1,25E-3	6,03E-6	0,84887	3,80E-1
l1	0	25,07	2	0,00E+0	29,03	1,30E+1	1,25E-3	7,74E-6	0,85198	3,81E-1
SAR	0	25,07	17,8	9,96E+0	23,00	1,23E+1	5,44E-3	9,01E-3	13,85347	2,92E+1
l1SAR	0,85	25,07	1,6	8,94E-1	23,34	1,25E+1	3,79E-3	5,62E-3	6,35828	1,23E+1
TVSAR	0,85	25,07	1,6	8,94E-1	23,37	1,25E+1	1,09E-3	3,94E-4	7,15522	1,41E+1
TV	0	29,07	2,4	1,34E+0	25,02	1,34E+1	4,75E-3	8,86E-3	4,95369	9,08E+0
l1	0	29,07	2,4	1,34E+0	25,03	1,35E+1	9,50E-4	3,81E-4	1,31260	9,43E-1
SAR	0	29,07	3,2	1,79E+0	24,57	1,32E+1	2,49E-3	3,56E-3	7,46164	1,47E+1
l1SAR	0,85	29,07	2,4	1,34E+0	25,10	1,35E+1	6,81E-4	2,04E-4	18,35454	3,90E+1
TVSAR	0,85	29,07	2,4	1,34E+0	25,03	1,35E+1	7,47E-4	8,64E-5	4,95286	9,08E+0
TV	0	34,07	5,6	3,13E+0	27,67	1,49E+1	3,03E-4	1,44E-4	20,91616	4,47E+1
l1	0	34,07	15,4	1,23E+1	26,75	1,44E+1	4,11E-4	1,73E-4	0,95330	2,63E-2
SAR	0	34,07	9,6	5,37E+0	25,91	1,40E+1	5,97E-4	2,35E-5	1,34447	9,25E-1
l1SAR	0,85	34,07	12,2	6,91E+0	27,63	1,49E+1	3,06E-4	1,52E-4	18,43585	3,91E+1
TVSAR	0,85	34,07	11,2	6,26E+0	27,69	1,49E+1	2,97E-4	1,55E-4	17,23525	3,64E+1
TV	0	39,07	12,0	6,71E+0	30,35	1,64E+1	1,42E-4	6,22E-5	18,61882	3,95E+1
l1	0	39,07	3,2	1,79E+0	26,45	1,42E+1	4,23E-4	2,24E-4	19,12040	4,06E+1
SAR	0	39,07	0,8	4,47E-1	29,27	1,58E+1	2,30E-4	3,11E-6	3,95783	6,73E+0
l1SAR	0,85	39,07	24,8	1,39E+1	30,73	1,67E+1	1,77E-4	5,54E-5	2,17887	2,70E+0
TVSAR	0,85	39,07	20,8	1,16E+1	30,65	1,66E+1	1,78E-4	4,80E-5	5,97818	1,12E+1
TV	0	44,07	18,4	1,03E+1	32,85	1,78E+1	7,10E-5	2,67E-5	16,66897	3,51E+1
l1	0	44,07	18,8	1,54E+1	31,17	1,73E+1	1,80E-4	2,53E-4	17,86120	3,78E+1
SAR	0	44,07	44,4	2,48E+1	31,92	1,73E+1	1,52E-4	9,72E-5	5,38314	9,85E+0
l1SAR	0,85	44,07	20,2	1,28E+1	31,76	1,76E+1	1,97E-4	2,03E-4	6,58267	1,25E+1
TVSAR	0,85	44,07	20,8	1,16E+1	33,38	1,81E+1	7,91E-5	1,78E-5	9,34919	1,87E+1
TV	0	49,07	40,8	2,73E+1	34,94	1,90E+1	9,53E-5	1,12E-4	4,79374	8,50E+0
l1	0	49,07	3,2	1,79E+0	26,48	1,43E+1	4,38E-4	1,79E-4	8,16161	1,61E+1
SAR	0	49,07	59,2	3,31E+1	35,94	1,95E+1	3,32E-5	1,97E-6	16,83376	3,54E+1
l1SAR	0,85	49,07	33,6	1,88E+1	35,93	1,96E+1	2,09E-4	3,92E-4	7,39497	1,43E+1
TVSAR	0,85	49,07	29,2	1,63E+1	35,62	1,94E+1	6,16E-5	5,41E-5	3,91471	6,53E+0
TV	0	54,07	53,2	2,97E+1	37,28	2,03E+1	7,57E-5	1,18E-4	1,59761	1,34E+0
l1	0	54,07	3,2	1,79E+0	26,29	1,41E+1	4,54E-4	2,11E-4	15,48036	3,25E+1
SAR	0	54,07	62,4	3,49E+1	38,21	2,08E+1	3,15E-5	3,09E-5	8,23783	1,62E+1
l1SAR	0,85	54,07	54,4	3,04E+1	38,00	2,07E+1	3,19E-5	2,91E-5	9,27792	1,85E+1
TVSAR	0,85	54,07	51,2	2,86E+1	37,69	2,05E+1	4,11E-5	4,58E-5	18,27774	3,86E+1
TV	0	64,07	52,6	2,94E+1	37,94	2,07E+1	7,52E-5	1,26E-4	1,39862	8,95E-1
l1	0	64,07	3,2	1,79E+0	26,44	1,43E+1	4,94E-4	6,10E-5	1,36149	9,16E-1
SAR	0	64,07	61,6	3,44E+1	38,95	2,14E+1	2,73E-4	5,78E-4	1,19891	4,48E-1
l1SAR	0,85	64,07	53,6	3,00E+1	38,59	2,12E+1	2,44E-4	5,10E-4	1,19884	4,48E-1
TVSAR	0,85	64,07	52,0	2,92E+1	38,33	2,10E+1	2,59E-4	5,42E-4	1,19872	4,48E-1

Tabela A.55 – Resultados da iteração cuja imagem HR estimada tem maior SSIM entre os testes feitos com convergência baseada em SSIM, a partir da imagem HR original *boats*

Método SR	λ	SNR (em dB)	Iteração		PSNR		MSE		SSIM	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	2	0,00E+0	29,02	2,09E-2	1,25E-3	6,03E-6	0,84887	4,48E-4
II	0	25,07	2	0,00E+0	29,03	1,30E+1	1,25E-3	7,74E-6	0,85198	3,81E-1
SAR	0	25,07	30,7	1,90E+1	30,67	4,84E+0	1,24E+0	2,77E+0	0,65352	3,65E-1
II SAR	0,85	25,07	4,7	6,13E+0	30,99	4,61E+0	7,35E-1	1,64E+0	0,67832	3,79E-1
TV SAR	0,85	25,07	4,9	6,41E+0	29,89	2,04E+0	9,28E-3	1,79E-2	0,67531	3,77E-1
TV	0	29,07	9,3	1,63E+1	31,84	2,14E+0	1,38E+0	3,09E+0	0,72462	4,05E-1
II	0	29,07	1,6	8,94E-1	30,70	2,18E-1	2,58E-2	5,58E-2	0,72180	4,03E-1
SAR	0	29,07	15,7	3,80E+0	31,53	2,75E+0	4,13E-1	9,21E-1	0,71128	3,97E-1
II SAR	0,85	29,07	4,6	5,87E+0	32,37	4,22E+0	2,11E-2	4,52E-2	0,72015	4,03E-1
TV SAR	0,85	29,07	1,8	4,05E-1	31,55	1,59E+0	3,53E-2	7,70E-2	0,72351	4,04E-1
TV	0	34,07	4,9	3,02E-1	37,01	6,09E+0	2,00E-2	4,38E-2	0,75640	4,23E-1
II	0	34,07	11,2	1,10E+1	33,81	1,55E+0	6,38E-3	1,32E-2	0,75337	4,21E-1
SAR	0	34,07	9,6	5,37E+0	31,96	4,60E-1	1,15E-2	2,45E-2	0,74462	4,16E-1
II SAR	0,85	34,07	8,9	4,79E+0	37,00	6,29E+0	1,68E-2	3,68E-2	0,75598	4,23E-1
TV SAR	0,85	34,07	6,5	1,22E+0	37,08	6,35E+0	9,44E-3	2,03E-2	0,75550	4,22E-1
TV	0	39,07	12,4	3,00E+0	39,48	4,03E+0	7,22E-3	1,58E-2	0,77888	4,35E-1
II	0	39,07	16,4	9,62E+0	35,61	7,28E+0	1,03E-2	2,17E-2	0,76238	4,26E-1
SAR	0	39,07	19,2	1,07E+1	34,09	1,07E+0	2,20E-3	4,14E-3	0,76451	4,27E-1
II SAR	0,85	39,07	18,4	1,03E+1	37,32	1,67E+0	3,83E-3	8,21E-3	0,77907	4,35E-1
TV SAR	0,85	39,07	13,4	7,50E+0	38,66	1,58E+0	5,00E-3	1,08E-2	0,77846	4,35E-1
TV	0	44,07	18,7	9,69E+0	42,11	2,90E+0	1,22E-2	2,71E-2	0,78897	4,41E-1
II	0	44,07	19,9	1,25E+1	40,32	5,51E+0	7,91E-3	1,72E-2	0,78154	4,37E-1
SAR	0	44,07	44,4	2,48E+1	39,88	5,17E-1	5,76E-3	1,26E-2	0,78315	4,38E-1
II SAR	0,85	44,07	19,6	1,11E+1	39,89	3,99E+0	7,82E-3	1,71E-2	0,78270	4,38E-1
TV SAR	0,85	44,07	20,2	1,03E+1	40,82	1,46E+0	2,82E-3	6,14E-3	0,78925	4,41E-1
TV	0	49,07	28,2	1,58E+1	41,56	4,03E+0	4,09E-3	9,03E-3	0,79441	4,44E-1
II	0	49,07	19	1,06E+1	33,57	2,53E+0	5,48E-3	1,10E-2	0,76489	4,28E-1
SAR	0	49,07	51,3	2,61E+1	45,19	1,32E+0	4,32E-3	9,58E-3	0,79386	4,44E-1
II SAR	0,85	49,07	32,8	1,83E+1	41,46	7,24E+0	2,44E-3	5,39E-3	0,79526	4,44E-1
TV SAR	0,85	49,07	28,9	1,59E+1	42,97	2,93E+0	7,28E-3	1,62E-2	0,79475	4,44E-1
TV	0	54,07	53,2	2,97E+1	43,20	7,10E+0	3,50E-3	7,78E-3	0,79779	4,45E-1
II	0	54,07	18,1	5,68E+0	34,39	5,07E+0	1,23E-2	2,61E-2	0,76258	4,26E-1
SAR	0	54,07	62,4	3,44E+1	46,87	1,45E+0	8,93E-3	1,99E-2	0,79783	4,46E-1
II SAR	0,85	54,07	52,7	2,93E+1	46,72	1,14E+0	9,82E-3	2,19E-2	0,79793	4,46E-1
TV SAR	0,85	54,07	52,8	2,50E+1	46,43	9,78E-1	7,76E-3	1,73E-2	0,79775	4,46E-1
TV	0	64,07	52,6	2,94E+1	43,98	7,22E+0	4,08E-3	9,07E-3	0,79878	4,46E-1
II	0	64,07	19,4	1,09E+1	32,13	6,03E-1	4,78E-3	9,40E-3	0,76479	4,27E-1
SAR	0	64,07	61,6	3,44E+1	44,61	8,72E+0	2,95E-3	6,56E-3	0,79916	4,46E-1
II SAR	0,85	64,07	53,6	3,00E+1	44,23	8,54E+0	2,62E-3	5,83E-3	0,79909	4,46E-1
TV SAR	0,85	64,07	52	2,92E+1	43,97	8,42E+0	2,98E-3	6,63E-3	0,79898	4,46E-1

Tabela A.56 – Tempo de execução (em segundos) de cada simulação dos testes feitos com convergência SSIM, a partir da imagem HR original *boats*

Método	λ	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão	SNR (dB)	Média	Desvio Padrão
TV	0	25,07	150,56	9,79E+0	34,07	143,95	8,14E+1	44,07	527,93	2,97E+2	54,07	699,15	3,92E+2
II	0	25,07	158,60	8,38E+0	34,07	215,10	1,31E+2	44,07	475,25	3,50E+2	54,07	201,86	1,15E+2
SAR	0	25,07	190,13	1,07E+2	34,07	113,60	6,39E+1	44,07	478,70	2,69E+2	54,07	785,45	4,40E+2
II SAR	0,85	25,07	123,85	6,96E+1	34,07	148,03	8,55E+1	44,07	397,45	2,84E+2	54,07	729,85	4,09E+2
TV SAR	0,85	25,07	124,36	6,98E+1	34,07	129,78	7,27E+1	44,07	489,55	2,76E+2	54,07	655,02	3,67E+2
TV	0	29,07	94,84	5,32E+1	39,07	241,54	1,36E+2	49,07	692,93	3,89E+2	64,07	677,92	3,79E+2
II	0	29,07	105,96	5,99E+1	39,07	206,83	1,18E+2	49,07	233,63	1,31E+2	64,07	236,56	1,33E+2
SAR	0	29,07	125,76	7,07E+1	39,07	208,80	1,17E+2	49,07	729,80	4,10E+2	64,07	741,16	4,16E+2
II SAR	0,85	29,07	87,18	4,91E+1	39,07	312,73	1,76E+2	49,07	711,01	3,98E+2	64,07	688,32	3,85E+2
TV SAR	0,85	29,07	79,92	4,49E+1	39,07	224,92	1,27E+2	49,07	667,41	3,73E+2	64,07	650,70	3,65E+2